



T.C.
Niğde Üniversitesi
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DAİRESEL SİLİNDİR ETRAFINDAKİ AKIŞIN AKTİF VE PASİF YÖNTEMLER
İLE KONTROLÜ

HÜRREM AKBIYIK

Temmuz 2014

T.C.
NİĞDE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DAİRESEL SİLİNDİR ETRAFINDAKİ AKIŞIN AKTİF VE PASİF YÖNTEMLER
İLE KONTROLÜ

HÜRREM AKBIYIK

Yüksek Lisans Tezi

Danışman

Doç. Dr. Yahya Erkan AKANSU

Temmuz 2014

Hürrem AKBIYIK tarafından **Doç. Dr. Yahya Erkan AKANSU**'nun danışmanlığında hazırlanan "**Dairesel Silindir Etrafındaki Akışın Aktif ve Pasif Yöntemler ile Kontrolü**" adlı bu çalışma jürimiz tarafından Niğde Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Makine Mühendisliği** Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Yrd. Doç. Dr. Mustafa SARIOĞLU, Karadeniz Teknik Üniversitesi



Üye :Doç. Dr. Yahya Erkan AKANSU (Danışman), Niğde Üniversitesi



Üye :Yrd. Doç. Dr. Fuat KARAKAYA, Niğde Üniversitesi



ONAY:

Bu tez, Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunca belirlenmiş olan yukarıdaki jüri üyeleri tarafından/...../20.... tarihinde uygun görülmüş ve Enstitü Yönetim Kurulu'nun/...../20.... tarih ve sayılı kararıyla kabul edilmiştir.

...../...../20...

Doç. Dr. Murat BARUT

MÜDÜR

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin bilimsel ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.



HÜRREM AKBIYIK

ÖZET

DAİRESEL SİLİNDİR ETRAFINDAKİ AKIŞIN AKTİF VE PASİF YÖNTEMLER İLE KONTROLÜ

AKBIYIK, Hürrem

Niğde Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman : Doç. Dr. Yahya Erkan AKANSU

Temmuz 2014, 60 sayfa

Bu tez çalışmasında, dairesel silindir etrafındaki akışın kontrolü için pasif akış kontrol yöntemi (ayırıcı plaka) ve aktif akış kontrol yöntemi (plazma aktuatör) birlikte kullanılmıştır. Tek dairesel silindir, dairesel silindir ile ayırıcı plaka, dairesel silindir ile plazma aktuatör ve ayırıcı plaka konfigürasyon durumları için deneyler yapılmıştır. Yapılan çalışmalarda elektrodinamik yöntemlerin önemli üç faktörü olan uygulanan voltajın etkisi, plazma oluşumu için frekansın etkisi ve di-elektrik malzeme kalınlığının etkisine bağlı olarak akış yapısı incelenmiştir. Rüzgar tüneline Reynolds sayısının 2000 ile 12500 değerleri arasında gerçekleştirilen bu çalışmada, test modeli olarak $D=40\text{mm}$ olan dairesel silindir ve $L=3.75D$ uzunluğunda ayırıcı plaka kullanılmıştır. Simetrik elektrot çifti dairesel silindir üzerine $\theta=\pm 90^\circ$ açıda olacak şekilde yerleştirilmiştir. Yük hücresi ile kuvvet ölçümlerinin ve kızgın-tel anemometresi ile hız ve girdap kopma frekansı ölçümlerinin yanı sıra duman-tel yöntemiyle akış görüntülemesi yapılmıştır. Aktif akış kontrol yöntemi, hem tek dairesel silindirle hem de pasif kontrol yöntemi ile birlikte kullanıldığında iz bölgesi genişliğini daraltarak sürüklenme kuvvetinde önemli azalmalar sağlamıştır.

Anahtar Sözcükler: Plazma aktuatör, dairesel silindir, ayırıcı plaka, akış kontrolü, sürüklenme kuvveti, girdap kopması, akış görüntülemesi.

SUMMARY

CONTROL OF FLOW AROUND A CIRCULAR CYLINDER BY USING ACTIVE AND PASSIVE CONTROL METHODS

AKBIYIK, Hürrem

Nigde University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Mechanical Engineering

Supervisor : Associate Professor Dr. Yahya Erkan AKANSU

July 2014, 60 pages

In this master thesis, passive (splitter plate) and active (plasma actuator) flow control methods were used together to control the flow around circular cylinder. Experiments accomplished in the case of single circular cylinder, circular cylinder with splitter plate, circular cylinder with splitter plate and plasma actuator configurations. The effect of plasma actuator to the flow structure were investigated. Also, the applied voltage, frequency and the dielectric thickness which effects the performance of plasma actuator were examined. Experiments were conducted at wind tunnel in the range of Reynolds number between 2000 to 12500, the circular cylinder of 40mm with splitter plate of 3.75D were used as a test model. The simetrical electrode pair was placed on the cylinder with $\theta=\pm 90^\circ$ angle. Drag force measurements by load cell and the velocity profiles and vortex shedding frequency in the wake by the hot-wire anemometer were conducted as well as the flow visualization by smoke-wire method. By using active flow control with the circular cylinder both only and the splitter plate, the drag force is reduced dramatically due to contraction in the wake region.

Keywords: Plasma actuator, circular cylinder, splitter plate, flow control, drag force, vortex shedding, flow visualization.

ÖN SÖZ

Cisimler etrafındaki akış cisimlerin aerodinamik kuvvetlere maruz kalmalarına sebebiyet verebilmektedir. Bu kuvvetlerin belirlenmesi ve etkilerinin incelenmesi de aerodinamik çalışmalar ile mümkün olmaktadır. Literatürde aktif ve pasif kontrol yöntemleri ayrı ayrı kullanılarak dairesel silindir etrafındaki akış kontrolünü sağlamaya yönelik birçok çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmada, her iki yöntemin bir arada kullanılması çalışmanın özgünlüğünü oluşturmaktadır. Dairesel bir silindir yüzeyinde plazma eyleyici kullanılarak ve aynı zamanda silindir arkasına ayırıcı plaka yerleştirilerek dairesel silindir üzerine etki eden ve kalıcı hasarlara sebebiyet veren aerodinamik kuvvetlerin kontrolü sağlanmaya çalışılmıştır. Bu tez çalışmasının sonuçlarıyla literatüre ve karşılaşılan sorunların çözümüne katkı sağlanması amaçlanmıştır.

Yüksek lisans tez çalışmamın yürütülmesi esnasında, çalışmalarına yön veren, bilgi ve yardımlarını esirgemeyen ve bana her türlü desteği sağlayan danışman hocam, Sayın Doç. Dr. Yahya Erkan AKANSU'ya en içten teşekkürlerimi sunarım. Yüksek lisans tez çalışmam esnasında tecrübelerine başvurduğum Yrd. Doç. Dr. Fuat KARAKAYA'ya, Doç Dr. Hüsnü AKSAKAL'a ve Makine Mühendisliği Bölümü Öğretim Üyelerine müteşekkir olduğumu ifade etmek isterim. Bu tezin hazırlanması esnasında desteklerini esirgemeyen kıymetli meslektaşlarım Aytaç ŞANLISOY, Rafet GÜNAYDIN, Mehmet SEYHAN, Tekmile AYDOĞDU, Ahmet Ertuğrul BAY ve Cihan YEŞİLDAĞ'a ve ayrıca kıymetli dostum Timuçin AYDOĞDU'ya teşekkürü bir borç bilirim.

Çalışmalarım süresince bana her zaman destek veren ablalarım Asuman TEMEL'e ve Burcu AKBIYIK ÇUNKUR'a, özellikle kız kardeşim SABAHAT AKBIYIK'a teşekkürü bir borç bilirim. Bu tezi, hayatta bana her zaman her konuda destek olan babam Mahmut AKBIYIK'a ve annem Nimet AKBIYIK'a ithaf ediyorum.

Ayrıca, bursiyer olarak görev aldığım 110M056 numaralı proje kapsamında finansal destek sağlayan TUBİTAK'a teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
SUMMARY	v
ÖN SÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
FOTOĞRAFLAR DİZİNİ	xii
SİMGE VE KISALTMALAR	xiii
BÖLÜM I AERODİNAMİK AKIŞ KONTROL YÖNTEMLERİ.....	1
1.1 Aerodinamik Akış Kontrolünün Sınıflandırılması	1
1.2 Pasif Akış Kontrol Yöntemleri	2
1.3 Aktif Akış Kontrol Yöntemleri	7
1.3.1 Sıfır net kütle akış eyleyicileri	7
1.3.1.1 Sentetik jetler	7
1.3.1.2 Piston-silindirmekanizmaları	8
1.3.1.3 Hoparlörler	9
1.3.2 Sıfır net kütle akışı olmayan eyleyicileri	10
1.3.2.1 Vurumlu jetler	10
1.3.3 Hareketli nesne/yüzey eyleyicileri	10
1.3.3.1 Piezoelektrik flaplar ve elektroaktif çukurlar.....	10
1.3.3.2 Esnek ve yer değişimli kanatlar	11
1.3.3.3 Şekil değişimli yüzeyler.....	11
1.4 Birleşik Akış Kontrol Yöntemleri.....	13
1.5 Tez Çalışmasının Bilimsel Önemi	14
1.6 Tezin Amacı ve Kapsamı.....	14
BÖLÜM II PLAZMA EYLEYİCİLER.....	15
2.1 Yüzey Dielektrik Bariyer Deşarjlı Eyleyiciler (SDBDA)	16
2.2 Yüzey Korona Deşarjlı Eyleyiciler (SCDA)	19

BÖLÜM III DENEYSEL ÇALIŞMALAR	20
3.1 Rüzgâr Tüneli	20
3.2 Plazmanın Oluşturulması	21
3.3 Test Modelinin Hazırlanışı	23
3.4 Ölçüm Sistemleri	24
3.4.1 Aerodinamik kuvvet katsayılarının ölçümü	25
3.4.2 Kızgın tel anemometresi ile iz bölgesi hız taraması	27
3.4.3 Duman-tel yöntemi ile akış görüntülemesi	29
BÖLÜM IV BULGULAR VE İRDELEMELER	30
4.1 Farklı Voltaj Değerleri İçin Yapılan Deneyler	30
4.2 Farklı Plazma Sürüm Frekans Değerleri İçin Yapılan Deneyler	35
4.3 Farklı Di-Elektrik Malzeme İçin Yapılan Deneyler	35
4.4 Tek Dairesel Silindir Ve Akış Kontrolü Durumlar İçin Yapılan Deneyler	37
4.5 Kuvvet Ölçümü İçin Yapılan Deneyler	40
4.6 İz Bölgesi Güç Spektrum Dağılımları ve Girdap Kopma Frekansları	42
BÖLÜM V SONUÇLAR	46
KAYNAKLAR	48
EKLER	52
ÖZ GEÇMİŞ	60

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 4.1. Modellerin kuvvet ölçümünün uygulanan voltaj değerine ve Reynolds sayısına göre değişiminin gösterimi	41
--	----

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Kontrol Çubuğu ile akış kontrolü (a) ve ayırıcı plaka ile akış kontrolü (b)	3
Şekil 1.2. Dairesel silindirin arka kısmına yerleştirilen paralel plakalar	4
Şekil 1.3. Silindirlerin konumları ile hız profilleri ve titreşim frekanslarının grafiksel gösterimi.....	5
Şekil 1.4. Kullanılan silindir konfigürasyonları.....	6
Şekil 1.5. Yapışık iki silindir için farklı Reynold sayılarındaki hız profilleri	6
Şekil 1.6. Birlikte kullanılan kontrol çubuğu ve silindir ($d/D=0.05$) girdap oluşumu ve akış çizgilerinin gösterimi	7
Şekil 1.7. Sentetik jet üretici	8
Şekil 1.8. Sentetik jet eyleyici	9
Şekil 1.9. Pulsed jet jeneratörünün görüntüsü	10
Şekil 1.10. Uçak kanadı profilinde eyleyici kullanılmadan, düşük voltaj uygulanan eyleyici ve yüksek voltaj uygulanan eyleyicinin sürüklenme ve kaldırma katsayılarına etkisinin gösterimi.....	13
Şekil 2.1. En yaygın plazma eyleyicilerin geometrik gösterimleri; korona (a), di-elektrik bariyer deşarj (b), sliding deşarj eyleyiciler (c).....	16
Şekil 2.2. Plazma panel şekilleri simetrik (a), asimetrik (b) ve simetrik plate alt elektrot (c)	17
Şekil 2.3. OUGDP etkisiyle durgun havada oluşturulan hız profili	17
Şekil 2.4. DBD 'nin yan görünüşünde plazma alanı (a), elektrik rüzgarı yönü (b) ve plazmanın üst görünüşü (c)	18
Şekil 2.5. Korona deşarjının gösterimi	19
Şekil 3.1. Rüzgar tüneli test bölgesinin ve deney sisteminin şematik görünümü.....	25
Şekil 3.2. Duman-tel akış görüntüleme sistemi şeması	29
Şekil 4.1 : Farklı voltaj değerleri için dairesel silindir arkasındaki hız profili	31
Şekil 4.2. Plazma sürüm voltaj değerleri (a) 4.8kV, 5.2kV, 5.6kV,6kV (b) 6.4kV,6.8kV, 7.2kV, 7.6kV	32
Şekil 4.3. $Re = 2700$ değeri için $V = 4.8kV, 6.0kV, 7.2kV$ voltaj değeri için dairesel silindir arkasındaki iz bölgesinin gözlemlenmesi	33

Şekil 4.4. $Re = 3200$ değeri için $V = 4.8kV, 6.0kV, 7.2kV$ voltaj değeri için dairesel silindir arkasındaki iz bölgesinin gözlemlenmesi	33
Şekil 4.5. $Re = 3700$ değeri için $V = 4.8kV, 6.0kV, 7.2kV$ voltaj değeri için dairesel silindir arkasındaki iz bölgesinin gözlemlenmesi	34
Şekil 4.6. $Re = 4200$ değeri için $V = 4.8kV, 6.0kV, 7.2kV$ voltaj değeri için dairesel silindir arkasındaki iz bölgesinin gözlemlenmesi	34
Şekil 4.7. Farklı frekans değerleri için dairesel silindir arkasındaki hız profilinin gösterimi.....	35
Şekil 4.8. Elektrotlar arasına döşenen di-elektrik malzemenin kalınlığının iz bölgesi üzerindeki etkisinin incelenmesi	36
Şekil 4.9. Dairesel silindirin tek başına kullanıldığı durum için hız profili taraması	37
Şekil 4.10. Dairesel silindir ve ayırıcı plaka kullanımı için hız profili taraması	37
Şekil 4.11. Farklı akış kontrol yöntemleri için iz bölgesinin incelenmesi.....	38
Şekil 4.12. Dairesel silindir için çeşitli Reynold sayılarındaki sürüklenme katsayılarının literatür ile kıyaslaması	42
Şekil 4.13. TDS, DSAP ve DSAPYP modelleri için $x/D=9$ ve $y/D=0.9$ konumunda elde edilen, hız zaman geçimişi (a) ve güç spektrumu (b) dağılımları ($Re=4400$)	42
Şekil 4.14. Tek dairesel silindir modeli için $x/D=9$ ve $y/D=0.9$ konumunda elde edilen a)Time-History ve b)Power spectrum ölçümleri.....	43
Şekil 4.15. Dairesel silindir ardına yerleştirilen ayırıcı plaka modeli için farklı Reynolds sayılarında $x/D=9$ ve $y/D=0.9$ konumunda elde edilen a)Time-History ve b)Power spectrum ölçümleri	44
Şekil 4.16. DSAP ve DSAPYP modelleri için $Re=4400$ 'de farklı voltaj değerlerinde $x/D=9$ ve $y/D=0.9$ konumunda elde edilen a)Time-History ve b)Power spectrum ölçümleri	45

FOTOĞRAFLAR DİZİNİ

Fotoğraf 1.1. Laminer ve türbülanslı akış yapısında akış ayrılması	3
Fotoğraf 1.2. Fiber kompozit eyleyici Görünümü	12
Fotoğraf 1.3. Kanat modeli profilinin yandan görünümü.....	12
Fotoğraf 3.1. Çalışmada kullanılan deney düzeneği.....	20
Fotoğraf 3.2. TREK MODEL 20/20C-HS yüksek voltaj amfisi	22
Fotoğraf 3.3. Sinyal üretiminde kullanılan FPGA tabanlı programın arayüzü.....	22
Fotoğraf 3.4. Osiloskopta sinyal formlarının incelenmesi.....	23
Fotoğraf 3.5. Dairesel silindirin katı model çizimi.....	23
Fotoğraf 3.6. Dairesel silindirin model haline getirilmiş hali.....	24
Fotoğraf 3.7 : Döndürme aparatına entegre edilmiş yük hücresi (a) ve ATI yük hücresi programının ara yüzü (b).....	26
Fotoğraf 3.8. Kızgın tel problemin test bölgesindeki konumları.....	28
Fotoğraf 4.2. $V=6kV_{pp}$, $f=3.5kHz$ 'de uygulanan akış kontrolünün iz bölgesi akış yapısı üzerine etkisinin görüntülenmesi	39

SİMGE VE KISALTMALAR

Simgeler	Açıklama
C_D	Sürüklenme kuvveti katsayısı
C_L	Kaldırma kuvveti katsayısı
F_D	Sürüklenme kuvveti
F_L	Kaldırma kuvveti
P	Basınç
P_{atm}	Atmosfer basıncı
Re	Reynolds sayısı
T	Sıcaklık
t	Zaman
U	Duvar jeti hızı
U_o	Serbest akış hızı
θ	Dairesel modelin önünden saat ibresi yönünde değişen açı
ρ	Yoğunluk
w_a	Elektrot genişliği
g	Elektrotlar arası boşluk
a	Di-elektrik malzeme kalınlığı
f	Plazma sürüm frekansı

Kısaltmalar	Açıklama
AC	Alternatif Akım
DBD	Dielektrik Bariyer Deşarjı
DC	Doğru Akım
EHD	Elektrohidrodinamik
MAV	Mikro Hava Araçları
MFC	Makro Fiber Kompozit
F	Yük hücresinden ölçülen kuvvet

F _{CC}	Dairesel silindir kuvveti
F _{OR}	Modeli taşıyıcı mile etki eden kuvvet
F _{DEP}	Üst uç plakaya etki eden kuvvet
F _{BEP}	Alt uç plakaya etki eden kuvvet
PK	Plazma kapalı
TDS	Tek dairesel silindir
TDSYP	Tek dairesel silindir ve yüzey plazması
DSAP	Dairesel silindir ve ayırıcı plaka
DSAPYP	Dairesel silindir, ayırıcı plaka ve yüzey plazması

BÖLÜM I

AERODİNAMİK AKIŞ KONTROL YÖNTEMLERİ

Cisimler etrafındaki akış alanları nedeniyle cisimler üzerine aerodinamik kuvvetler etki etmektedir. Bu kuvvetlerin belirlenmesi ve etkilerinin incelenmesi de aerodinamik çalışmalar ile mümkün olmaktadır. Akış kontrol yöntemleri ile aerodinamik kuvvet katsayılarının iyileştirilmesi, akış ayrılmasının önlenmesi veya geciktirilmesi, sınır tabakanın baskı altına alınması, gürültü ve titreşim miktarının azaltılması mümkün olmaktadır. Dairesel silindir gibi küt cisimler akış doğrultusuna göre oldukça büyük kesit alana sahip olduğundan akışkanı yüzeyden ayırmaya zorlar. Yani cisim etrafındaki akışta akış çizgileri cismin yüzeyini takip etmez ve akış yüzeyden ayrılır. Ayrıca cismin arkasında geniş bir iz bölgesi oluşur. Dairesel silindir üzerinden ayrılan akış tabakalarının iz bölgesindeki negatif basınç nedeniyle iz bölgesi içerine doğru kıvrılması sonucunda cisim arkasında girdaplar oluşmaktadır. Bu girdapların periyodik olarak cisimden kopması nedeniyle oluşan dinamik kuvvetler, cisim üzerinde titreşime neden olur. Akış ile cismin etkileşimi sonucu meydana gelen dinamik yükler ve gürültü cisim üzerinde yapısal hasarlara sebebiyet verebilmektedir. Dairesel silindir etrafındaki akış sayesinde cisim üzerinde oluşan sürüklenme kuvveti ve iz bölgesindeki girdap kopmaları cismin aerodinamik özelliklerini oluşturmaktadır. Akış ayrılmasının geciktirilmesi ve aerodinamik kuvvet katsayılarının iyileştirilmesi için çeşitli akış kontrol yöntemleri uygulanmaktadır. Literatürde yapılmakta olan akış kontrol yöntemleri, yöntemde enerji kullanımı durumuna göre aktif veya pasif olarak sınıflandırılmaktadır. Burada, her iki yöntem hakkında detaylı bilgi verilecek olup ayrıca birleşik akış kontrol yöntemi detaylı bir şekilde anlatılacaktır.

1.1. Aerodinamik Akış Kontrolünün Sınıflandırılması

Aerodinamik akış kontrolü, Gad-el-Hak (2000) tarafından bir akış alanının istenilen kısmının, doğal şeklinin veya karakterinin uygun şekilde değiştirilmesi için uygulanan yöntemler olarak tanımlanmaktadır. Bu yöntemler ile aerodinamik kuvvet katsayılarının geliştirilmesi, akış ayrılmasının önlenmesi veya geciktirilmesi, uçak kantlarında stol

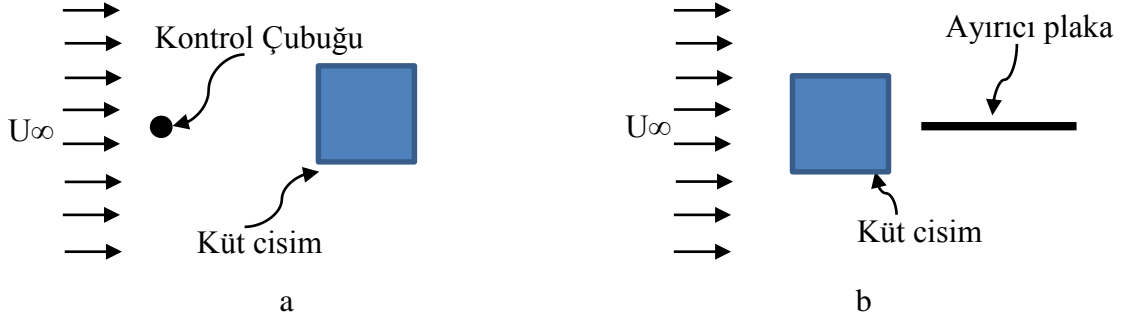
açısının daha yüksek açılara kaydırılması, sınır tabakanın geliştirilmesi, gürültü ve titreşim miktarının azaltılması mümkün olmaktadır. Akış kontrol yöntemlerinin en yaygın sınıflandırması aktif ve pasif olarak yapılmaktadır. Fakat günümüzde yapılan çalışmalar göz önüne alındığında birleşik akış kontrol yöntemlerinin giderek önem kazandığı görülmektedir. Çünkü bu yöntemler en az iki aktif ve/veya pasif akış kontrol yöntemini içermektedir. Aktif akış kontrolünde, sistemde ilave bir enerji kullanımı söz konusuken; pasif akış kontrolü ise sistemde ilave enerji kullanımı olmaksızın yapılan geometrik düzenlemeleri içermektedir.

1.2 Pasif Akış Kontrol Yöntemleri

Pasif akış kontrol yöntemlerinde harici bir enerji kullanılmaması ve akış karakteristiklerinde önemli iyileşmeler sağlayabilmesinden dolayı bu konuda literatür de çok sayıda çalışma yapılmıştır. Literatürde bulunan bazı pasif akış kontrol yöntemleri hakkındaki çalışmalar; cisim arkasına ayırıcı plaka yerleştirilmesi, yüzey pürüzlülüğü veya yüzeye yerleştirilen akış bozucu tel vb. elemanlar, keskin köşelerde yapılan yuvarlatmalar, cismin belirli kısımlarına açılan çentikler-yarıklar ve cisim önüne yerleştirilen bir kontrol çubuğu ile akışın kontrol edilmesi şeklinde sıralanabilir. Burada pasif akış kontrol yöntemleri üzerine yapılan literatürdeki çeşitli çalışmalara yer verilmiştir.

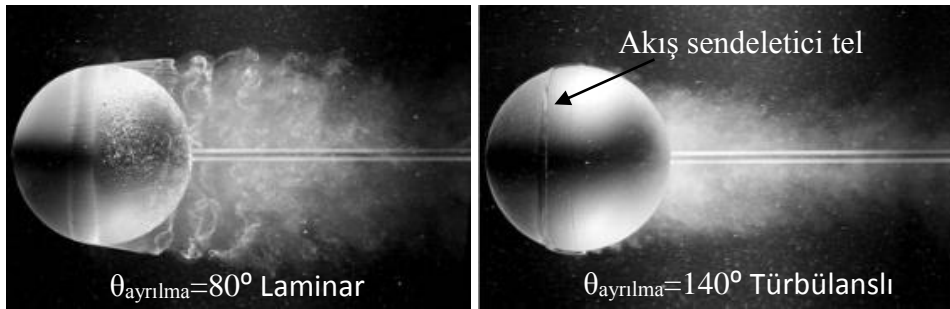
Şekil 1.1a'da görüldüğü üzere, kontrol çubuğu ile akış kontrolünde, cisim önüne küçük çaplı bir cisim yerleştirilmektedir. Akış öncelikle kontrol elemanına çarpmakta ve kontrol elemanından ayrılan akış tabakasının oluşturduğu iz bölgesi arkadaki cismi etkilemektedir. İki cisim arası mesafeye bağlı olarak hem küt cismin ön kenarındaki pozitif basınç düşmekte hem de küt cisim iz bölgesinin daralmasına bağlı olarak arka tarafındaki negatif basınçta yükselme görülmektedir. Ön ve arka kenardaki bu basınç değişimleri cisme etki eden sürüklenme kuvvetinin azaltılması yönünde önemli rol oynamaktadır. Sarıoğlu vd.'nin (2005) yapmış olduğu çalışmada, kontrol çubuğu ile sürüklenme kuvvetinde %70'e varan azalma elde etmişlerdir. Şekil 1.1b'de ayırıcı plaka ile yapılan akış kontrolünde küt cismin arkasına yerleştirilen ayırıcı plaka neticesinde girdap bölgesinin yapısı ve iz bölgesi değişmektedir. Akansu vd. (2004), yapmış oldukları çalışmada ayırıcı plakanın 0 ile 180° aralığında döndürülmesi neticesinde silindirin

arkasında oluşan iz bölgesinin ve basınç dağılımının, eğim açısı ile değişimini incelemiştir.



Şekil 1.1. Kontrol Çubuğu ile akış kontrolü (a) ve ayırıcı plaka ile akış kontrolü (b)

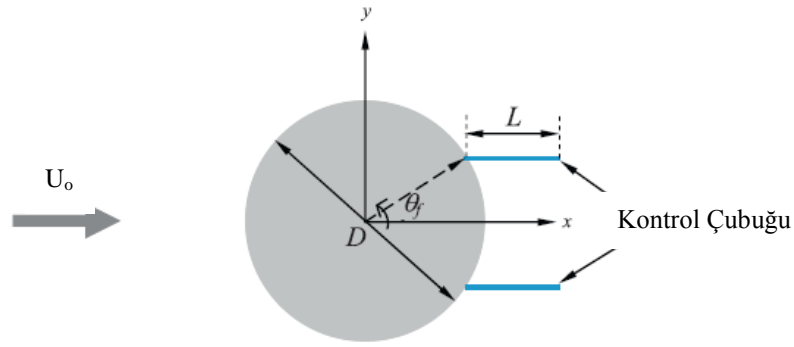
Pürüzlü yüzeyler veya akış sendeletici (trip-wire) kullanılarak akışın laminer yapıdan türbülanslı yapıya geçirilmesi mümkündür. Türbülanslı akışta, akışkan yüzeyden ayrılmaya ters basınç nedeni ile daha fazla direnmektedir. Cismin yüzey pürüzlülüğünün artırılması veya akış sendeleticilerin kullanılması ile Fotoğraf 1.1’de olduğu gibi akışın daha yüksek açılarda yüzeyden ayrılması mümkündür. Böylece cisim arkasındaki iz bölgesi daralmakta ve basınç sürüklenmelerinin düşürülmesine imkan sağlanmaktadır (Çengel ve Cimbala, 2007).



Fotoğraf 1.1. Laminer ve türbülanslı akış yapısında akış ayrılması (Werlé, 1980).

Ayrıca cisim geometrisinin yeniden düzenlenmesi ile keskin köşelerin yuvarlatılması veya gerekli yerlere kanallar açılması ile de sürüklenme kuvvetleri azaltılabilmektedir. Bao vd. (2013), literatürde kullanılan tek ayırıcı plaka yönteminden farklı olarak iz bölgesine iki paralel plaka yerleştirmişlerdir. Şekil 1.2’de görülen laminer akış rejiminde dairesel silindirin arka kısmına simetrik olarak yerleştirilen plakalar yardımıyla girdap

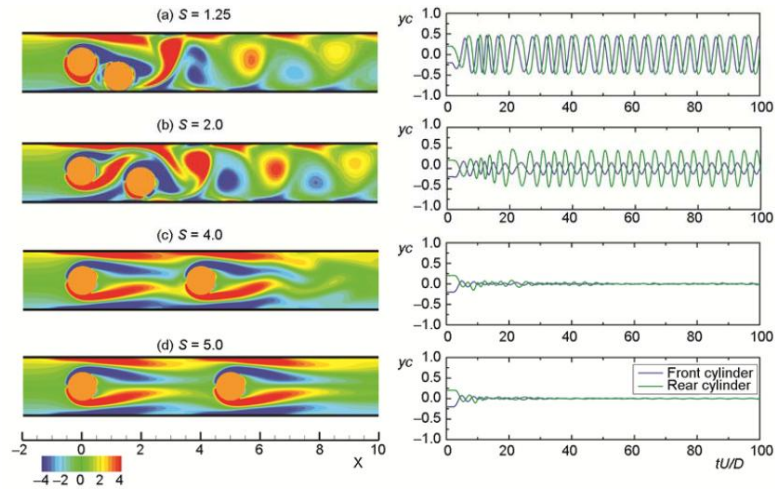
kontrolü nümerik olarak incelenmiştir. Plakanın dairesel silindir üzerine tutunma açısı olan ve dairesel silindirin arka noktasından başlayan θ_f açısı $0^\circ - 90^\circ$ aralığında değiştirilmiştir. Tek ayırıcı plaka kullanımına karşı, iki plaka kullanımı sürüklenme kuvvetinin azalmasını arttırmıştır ve belirli bir uzunluğa kadar kısa plaka uzunluklarında girdap oluşumunun önlenmeye çalışılmasını güçlendirmiştir. Bu da göstermiştir ki plakanın konum açısı kontrol veriminde çok önemli etkiye sahiptir ve burada ki en etkili aralık $40^\circ < \theta_f < 50^\circ$ aralığındaki maksimum sürüklenme azalması ile alakalıdır. Bu rejimde serbest kayma tabakaları kontrol plakalarının dış yüzeyine yeniden tutunmaktadır. Bu çalışmada, $Re=160$ değerinde maksimum sürüklenme azalması %13,1 olarak bulunmuş olup, bu değer tek ayırıcı plaka durumunda elde edilen değer iki katıdır.



Şekil 1.2. Dairesel silindirin arka kısmına yerleştirilen paralel plakalar (Bao vd., 2013)

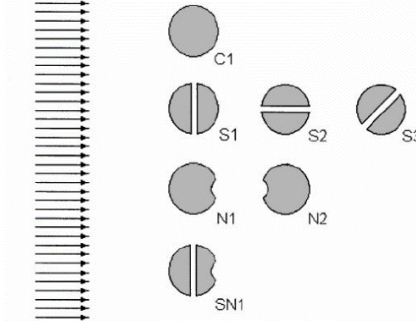
Zdrakovich (1988) tarafından yapılan çalışmada iki dairesel silindirin farklı konumlarında akış alanındaki etkileşimleri dört ana grupta sınıflandırılmıştır. Bunlar; yakınlık etkileşim (akış alanında iki silindirin birbirlerinin iz bölgesinde kalmayacak şekilde konumlanması), iz etkileşimi (akış yapısı, silindirlere birinin kısmen veya tamamen diğerinin iz bölgesi içerisinde olması durumu), iz ve yakınlık etkileşimi (akış yapısında, iki cisim arasındaki mesafenin küçük olması durumundan dolayı, öndeki cismin arkasındaki iz bölgesi arkadaki cisim tarafından bozulmaktadır), etkileşimsiz (akış yapısında her iki cisimde birbirinin akış yapısını etkilemeyecek kadar birbirlerinden uzak mesafelere bulunması) durumlarıdır. İki cisim arasındaki mesafeye, hücum açısına, cismin büyüklüğüne ve geometrilerine bağlı olarak bu etkileşimlerdeki akış yapılarının sınırlarının değiştiği gözlemlenmiştir.

Benzer bir çalışma olan fakat nümerik olarak ortaya konulan diğer bir çalışmayı Jiang (2012) yapmıştır. Şekil 1.3’de görüldüğü gibi bir kanal içerisinde dairesel silindirler farklı konumlandırılarak nümerik olarak incelenmiştir. İki silindir arasındaki yatay mesafe 1.1’den 10’a kadar farklı konumlarda yerleştirilen ikili silindirlerin etrafındaki akış yapıları incelenmiştir ve periyodik ve periyodik olmayan titreşim rejimleri üzerine çalışılmıştır. Sonuç olarak bu çalışmada ikili silindirlerin konumlarına bağlı olarak silindirler arasındaki mesafenin titreşim frekansı ve titreşimin büyüklüğü için önemli olduğu ortaya konulmuştur.



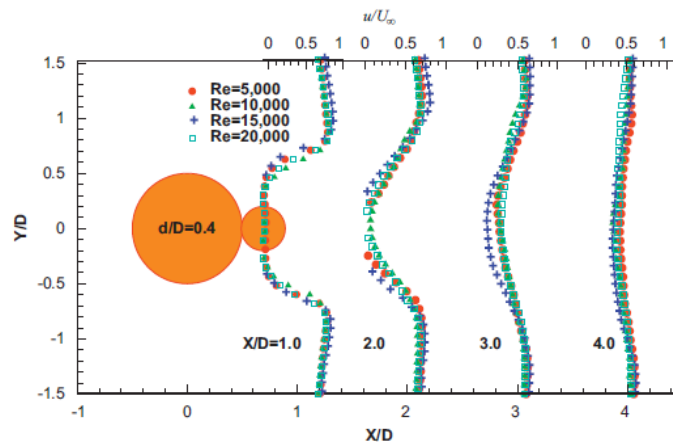
Şekil 1.3. Silindirlerin konumları ile hız profilleri ve titreşim frekanslarının grafiksel gösterimi (Jiang, 2012)

Olsen vd. (2000), yaptıkları çalışmada girdap oluşumu dairesel silindirin arka kısmına konkav çentik ya da yarık açılarak modifiye edilip incelenmiştir. Strouhal sayısı/Reynold sayısı (St_D/Re_D) ilişkisi ve sürüklenme katsayısının tanımlaması üzerinde ayrıntılı olarak çalışılmıştır. Modifiye edilen silindirler için St_D/Re_D ilişkisinin düz dairesel silindire göre belirli biçimde farklılıklara sahip olduğu gözlemlenmiştir. Özellikle St_D sayısı yarığın akışa dik olduğu silindirler için $60 < Re < 1000$ aralığında tek dairesel silindirden daima daha fazladır. $Re=2200$ iken akışa dik konumlu yarıklı silindir durumunda ve hem akışa dik yarıklı silindir hem de arka yüzeyde konkav çentik bulunan silindir durumunda C_D katsayıları sırasıyla 1.41 ve 2.52 olarak bulunmuştur. Bu değerler düz dairesel silindirin $C_D=0.94$ olan değeriyle karşılaştırıldığında oldukça büyüktür. Bu çalışma neticesinde silindir modifiyesinin girdap oluşumunda ciddi bir farklılık oluşturduğu ortaya konmuştur. Bu iki silindir şekilleri aşağıdaki Şekil1.4’de gösterilmiştir.



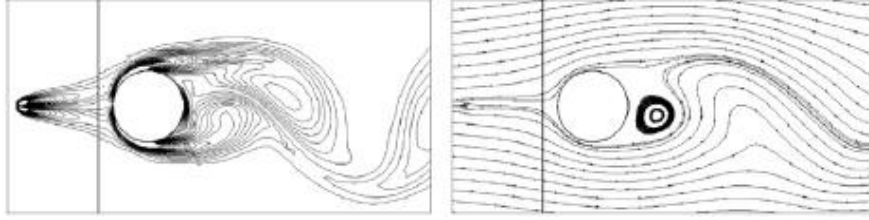
Şekil 1.4. Kullanılan silindir konfigürasyonları (Olsen vd., 2000)

Gim vd. (2011), dairesel silindirin arka kısmına yerleştirilen farklı boyutlardaki kontrol çubuğu ile akış kontrolü incelenmişler ve PIV ile akış görüntülemesi yapılmışlardır. Su tüneli içerisinde yapılan bu çalışmada kullanılan dairesel silindirin çapı 50 mm olup $Re=5000$, 10000 , 15000 ve 20000 değerlerinde deneyler yapılmıştır. Zaman-ortalama hız aralığı, türbülans yoğunluğu ve Reynold kayma gerilimi 4 kontrol çubuğu ve 4 Reynolds sayısı için ölçümler alınmıştır. Şekil 1.5’de görüldüğü gibi kontrol çubuklarından dolayı silindir arkasındaki iz oluşumu izin alt ve üst kısımlarındaki etkileşimden etkilenmiştir. Deneydeki her bir kontrol çubuğu ayrı ayrı özelliktedir fakat her bir Reynold sayısı için optimum kontrol çubuğunun olmadığı belirtilmiştir. Her durum için $x/D=2,5$ durumunda güçlü türbülans yoğunluğu gözlemlenmiştir. Kontrol çubuğunun yani $d/D=0,3$ oranı için türbülans yoğunluğunu azaltan önemli etkilere sahip olduğu gözlemlenmiştir. Tüm Reynolds sayıları için ($0,1$ m/s’den $0,4$ m/s’ye) optimum kontrol çubuğu olmadığı belirtilmiştir.



Şekil 1.5. Yapışık iki silindir için farklı Reynold sayılarındaki hız profilleri (Gim vd., 2011)

Zhang vd. (2006), bu nümerik çalışmada dairesel kontrol çubuğunun dairesel silindir üzerindeki etkilerini incelemiştir. Deneysel düşük Reynolds sayısında ($Re=200$) gerçekleştirmişlerdir. Farklı çubuk çapları ve cisimler arası boyutsuz mesafeler için iki boyutlu viskoz sıkıştırılmaz akışkanın laminer akış üzerine etkilerine çalışılmıştır ve denklem çözümleri Fluent® ile yapılmıştır. Kontrol çubuğu çapına ve cisimler arası mesafeye bağlı olarak iki farklı akış yapısının bulunduğunu belirtmişlerdir. Kontrol çubuğu çapının dairesel silindir çapının yarısı olduğu ve cisimler arası mesafenin kritik mesafeye ulaşmadığı en yakın değeri alması durumunda sistemin sürükleme katsayısında %35'lik ve kaldırma katsayısının rms (root-mean-square) değerinde %73'lük bir düşüş sağlandığı belirtilmiştir. Şekil 1.6'da bu çalışmaya ait girdap oluşumu ve akış çizgileri görülmektedir.



Şekil 1.6. Birlikte kullanılan kontrol çubuğu ve silindir ($d/D=0.05$) girdap oluşumu ve akış çizgilerinin gösterimi (Zhang vd., 2006)

1.3 Aktif Akış Kontrol Yöntemleri

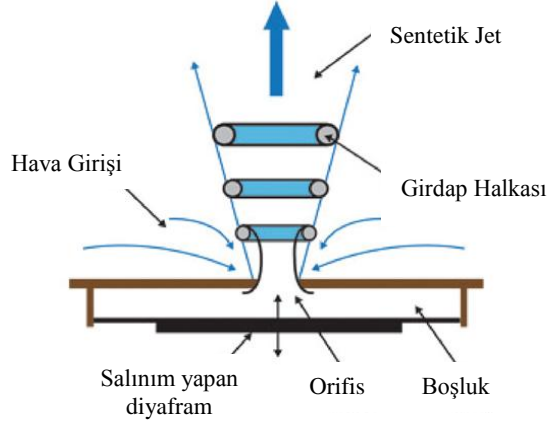
Aktif akış kontrolü, cisim yapısında herhangi bir değişiklik olmaksızın sistemde enerji kullanılarak cisim etrafındaki akışın kontrol edildiği yöntemdir. Burada aktif akış kontrol yöntemlerinden, döner yüzeyler ile akışa momentum transferi, sıfır net kütle akılı sentetik jetler, üfleme veya emme yapan kanallar vb. yöntemler hakkında bilgi verilecektir.

1.3.1 Sıfır net kütle akış eyleyicileri

1.3.1.1 Sentetik jetler

Sentetik jetler ile akışa kütle transferi olmaksızın, bir delikten ard arda akışkanı emme ve üfleme döngüsü ile akışa momentum eklenmektedir. Sentetik jet üretici Şekil 1.7'de görüldüğü gibi; diyafram, emme ve üfleme için gerekli olan hacim ve jetin çıktığı

orifisten oluşmaktadır. Tetiklenen piezoelektrik diyafram salınım yapmakta ve bu salınım neticesinde diyaframın yukarı hareketi ile üfleme, aşağı hareketi ile emme yapılmaktadır. Üfleme sonucunda orifisten çıkan akışkan dairesel sentetik jetlerde girdap halkası şeklinde, düzlemsel sentetik jetlerde girdap çifti şeklinde ayrılmaktadır (Tuck ve Soria, 2008). Emme esnasında girdap halkası yüzeyden uzaklaştığı için boşluğa giren akışkandan etkilenmemektedir (Smith ve Glezer, 1998).



Şekil 1.7. Sentetik jet üretici (Azar, 2012)

Basit dizaynı, asgari hareketli parçaları, yağlama ihtiyacının olmaması ve yüksek güvenilirliğinden dolayı sanayide, otomotiv sektöründe, medikal sektöründe, havacılıkta ve elektronik uygulamalarda kullanılmaktadır. Sessiz çalışma karakteri piezo eyleyicileri harika bir otomatik mekanizma haline getirmektedir.

Düşük güç tüketimi, geniş bant genişliği ve DC'den birkaç kHz aralığında geniş bant çıkışına sahiptir.

1.3.1.2 Piston-silindir mekanizmaları

Başka bir ZNMF çeşidi ise piston-silindir mekanizmasıdır. Burada motor tarafından tahrik edilen piston silindir mekanizmasının hareketi akışkanın akışına etki etmektedir. Bu etkime ile akışkana salınım kazandırılmaktadır.

Akansu ve Fırat (2010), $Re=8000$ değerinde kare prizma etrafındaki akışın kontrolünü sağlamak için bir kenarın ortasındaki slot yarıktan sentetik jet oluşturarak deneysel

çalışmışlardır. Sentetik jeti, Şekil 1.8’de görülen piston-silindir mekanizmasını kullanarak oluşturmuşlardır. Çeşitli akış kontrol parametrelerini belirlemek için pistonun frekansını ve pistonun stroğunu değiştirmişlerdir. Kare prizma üzerindeki sentetik jetin ön, üst ve arka kenardan gönderilmesi durumları için çeşitli momentum katsayılarını, uyarım frekanslarını, ortalama ve çalkantı basınç dağılımındaki değişimleri göstermişlerdir. Girdap oluşum frekanslarını hem basınç-zaman hemde hız-zaman geçmişinin spektral analizi ile belirlemişlerdir. Bu çalışmada, en yüksek strok değeri olan 130 mm ve $F^+=0.1053$ değerinde, sistemin sürüklenme katsayısındaki maksimum azalmayı %15.6 olarak bulmuşlardır.



Şekil 1.8. Sentetik jet eyleyici (Akansu ve Fırat, 2010)

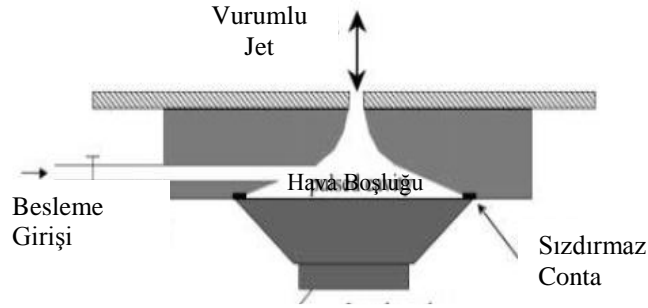
1.3.1.3 Hoparlörler

Bir hava akımı kontrol cihazı, bir hoparlörün üst tarafının üzerinde küçük bir delik bulunan levha ile kapatılmasıyla elde edilir. Hoparlörler genellikle bir sabit mıknatıs, diyafram ve elektro manyetik alan oluşturan bobinden meydana gelmektedir. Bobinin üzerinden alternatif akım geçirilmesiyle farklı yönlerde elektromanyetik alan oluşur. Oluşan elektromanyetik alan mıknatısın manyetik alanı ile aynı yönde ise itilir zıt yönde ise çekilir. Böylelikle bobinin bağlı olduğu diyafram titreşmeye başlar. Bu titreşim sonucunda hareket elde edilmiş olur.

1.3.2 Sıfır net kütle akışı olmayan eyleyicileri

1.3.2.1 Vurumlu jetler

Pulsed jetler uzun yıllardır bir çok uygulamada kullanılmaktadır. Pulsed jet bir istikrarsız jet çeşididir. ZNMF gibi değildir çünkü ek bir akış kaynağına ihtiyaç vardır. Bunlar çıkış boşluğunda anlık yüksek hız üretirler. Böylece akışa momentum kazandırır. Şekil 1.9'da vurumlu jetlerin yapısı görülmektedir. Ayrıca pulsed jetler duty cycle ile kare dalga tarafından belirli bir zaman aralığında aktif hale getirilerek karakterize edilebilir. Bu jetler hızlı işlevli selenoid valfler, yüksek hızlı dönel siren valfleri ya da dönel boşluklu yapılar gibi oluşturulabilirler (Critten vd., 2001).



Şekil 1.9. Pulsed jet jeneratörünün görüntüsü (Bera vd., 2001)

1.3.3 Hareketli nesne/yüzey eyleyicileri

Hareketli yüzey eyleyicileri farklı formlarda olabilirler ama en yaygın olanları piezoelektrik kompozit flaplar ve elektroaktif çukurlardır.

1.3.3.1 Piezoelektrik flaplar ve elektroaktif çukurlar

Piezoelektrik flap eyleyicilerin akış ayrılmasını iyileştiren uygulamaları bulunmaktadır.

Piezoelektrik flaplar rüzgar türbinlerinin kanatçıklarında da kullanılmaktadır. Rüzgar gücü jeneratörlerinin maliyet verimliliği ve uzun süreli kullanımını sağlamak amacıyla uygulamaya konulmuştur. Hatta kanatçıklardaki yük kontrol tekniklerinden dolayı da epey ilgi odağı olmuştur.

Helikopter pervanelerinin arka uç flap tetiklenmesi ve pervane titreşiminin azaltılması için gerekli olan yüksek frekanslarda, kanatların yüksek açılı oranı ve titreşim kontrolü önemli bir konudur. Eyleyiciler bu noktada bu probleme hızlı yanıt verebilmek ve bir dereceye kadar yüksek kuvvetlerde geniş bir deplasman sağlamak için önemli bir görev almaktadır (Ardelean vd., 2003).

1.3.3.2 Esnek ve yer değişimli kanatlar

Uçak kanatları havadayken de yerdeyken de aynı görünüme sahiptir. Birçok farklı model uçakta kanatlar, gövde boyu uzunluğundan daha geniş olduğu gibi, kolay bükülmemesi için belirli bir sertliğe sahiptir. Flap/slut gibi yapılar uçak kanatlarında kullanılarak uçağın yönlendirilmesini sağlamaktadır ve uçakların inişi esnasında uçağın hızını azaltarak uçağın alçalmasını sağlamaktadır. Böylelikle uçaklarda uçuş şartlarına göre değişiklikler yapılabilmektedirler.

Ağır yükleri kaldırmak ve aerodinamik kuvvet üretimini artırıp azaltmak için kullanılabilirler. Yüksek hızlarda en iyi kanat şekli uçları ileriye doğru çekik kanatlardır. Düz kanatlar ise daha fazla kaldırma kuvveti sağlar. Bu, kalkış ve iniş sırasında önemlidir. Bu iki özellikten de yararlanmanın tek yolu konumlarını değiştirebilen kanatlar yapmaktır.

1.3.3.3 Şekil değişimli yüzeyler

Bir kanat şeklini değiştirme yeteneği, farklı uçuş koşullarına adaptasyon sağlar. Böylece uçak performansını arttırmak için kanatlar farklı olarak optimize edilebilmektedir. Kanatların optimizasyonunda, geçişlerin sağlanmasında ve uygulamasında birçok zorluk bulunmaktadır. Bu zorluklar eyleyiciler tarafından aşılabilmektedir. Örneğin hidrolik, pnömatik, elektrik motorları ve şekil değişimli alaşımlar gibi akıllı malzemeler kullanılabilirler.



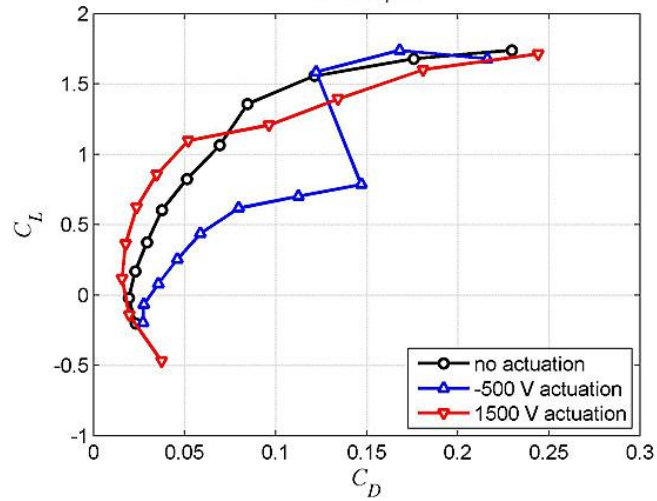
Fotoğraf 1.2. Fiber kompozit eyleyici Görünümü (URL-1)

Fotoğraf 1.2’de görülen fiber kompozit eyleyiciler performansı arttırmak için kanat şeklinin değişmesini sağlamak amacıyla kullanılmaktadır. Fotoğraf 1.3’de görülen kanada bağlanan MFC eyleyicilere negatif voltaj uygulanarak şekil dışarı doğru saptırılır ve pozitif voltaj uygulanarak şekil içeriye doğru saptırılır ve bunun neticesinde hareket sağlanmış olur.



Fotoğraf 1.3. Kanat modeli profilinin yandan görünümleri (URL-1)

Şekil 1.10’da görüldüğü üzere siyah çizgiyle belirtilen herhangi bir eyleyici olmadan, kırmızı ve mavi çizgiyle gösterim kaldırma katsayısının yüksek voltaj uygulanarak kullanılan eyleyicinin etkisiyle sürükleme katsayısına etkisi gösterilmiştir. Kaldırma katsayısı için en iyi performans yüksek voltaj uygulanan eyleyicide görülmüştür. MFC elemanları kullanılarak yüzey şekillendirilmesi bir kanadın aerodinamik performansı için yararlı olduğu görülebilmektedir.



Şekil 1.10. Uçak kanadı profilinde eyleyici kullanılmadan, düşük voltaj uygulanan eyleyici ve yüksek voltaj uygulanan eyleyicinin sürüklenme ve kaldırma katsayılarına etkisinin gösterimi (URL-1)

Plazma eyleyiciler daha detaylı bir biçimde Bölüm II'de anlatılacaktır.

1.4 Birleşik Akış Kontrol Yöntemleri

Birleşik akış kontrol yöntemi hem aktif akış kontrol yöntemi hem de pasif akış kontrol yönteminin bir arada kullanılmasıyla ortaya çıkan bir kontrol yöntemidir. Çalışmalarda sadece aktif akış kontrol yöntemi kullanmak ya da sadece pasif akış kontrol yöntemi kullanmak yeterli olmayabilmektedir. Bu gibi durumlarda performansın daha iyi geliştirilmesi ve sürüklenme katsayısının düşürülmesi için birleşik akış kontrol yöntemi kullanılmaktadır.

Reza-zadeh (2003) tarafından yapılan çalışmada dairesel silindir arkasına yerleştirilen ayırıcı plaka ve dairesel silindirin üst yüzeyinde oluşturulan korona deşarjı ile akış kontrolü sağlanılmaya çalışılmıştır. Bu çalışmada, birleşik akış kontrol yöntemi (aktif ve pasif) kullanılmıştır. Simülasyonlar elektrik alan ile akış kontrolü arasındaki etkileşimden oluşmaktadır. Model koşulları farklı pozisyonlardaki ayırıcı plaka konumu ve plazma pozisyonu $\theta=90^\circ$ 'ye ayarlanmıştır. Korona oluşumu düşük Reynolds sayılarında daha etkili olduğu için bu çalışmada $Re=40$ alınmıştır. Silindir üzerindeki basınç dağılımı hesaplanmış ve akış görüntülemesi yapılmıştır. İki farklı konumda korona rüzgarları oluşturulmuştur.

1.5 Tez Çalışmasının Bilimsel Önemi

Dairesel silindirler üzerinde yapılan birçok çalışma bulunmaktadır. Günümüzde bu çalışmalar devam etmektedir. Plazma eyleyiciler hafif, basit yapısı, tepki süresinin hızlı olması ve verilen elektrik enerjisinin herhangi bir hareketli parça gerektirmeden direkt kinetik enerjiye dönüştürmesi nedeni ile bilim adamlarının ilgisini çeken bir konudur. Plazma eyleyicilerin kullanılması, kaldırma kuvvetinde artış, sürüklenme kuvvetinde azalma, akış ayrılmasının geciktirilmesi, stol olayının daha yüksek açılara kaydırılması, sınır tabakanın iyileştirilmesi gibi akış kontrolünü geliştirebilecek birçok olumlu özelliğe sahiptir. Ayrıca son yıllarda konu üzerine yapılan çalışmalar hızlanarak artmaktadır. Bunların yanında dairesele silindir ile birlikte çalışılan ayırıcı plakanın olumlu sonuçlarından dolayı en yaygın kullanılan pasif akış kontrol yöntemlerinden birisidir. Girdap kopmaları neticesinde oluşan cisim titreşimlerine, cismin tahrip olmasına sebebiyet veren kuvvetler ve bunlar gibi birçok mühendislik uygulamasında karşılaştığımız problemlerin çözümüne katkı sağlayabilmek için hem aktif hem de pasif kontrol yöntemleri ayrı ayrı kullanılarak aynı zamanda bir arada kullanılarak literatüre katkı sağlanması amaçlanmıştır.

1.6 Tezin Amacı ve Kapsamı

Bu tezin amacı, aktif ve pasif kontrol yöntemleri kullanılarak dairesele silindir etrafında oluşan aerodinamik kuvvetlerin kontrolünün sağlanması, plazma eyleyicilerin çalışma prensibinin öğrenilmesi, plazma eyleyiciyi etkileyen parametrelerin incelenmesi, performansının geliştirilmesi ve akış kontrolüne uygulanmasıdır. Burada birleşik kontrol yöntemi kullanılarak akış kontrolünün daha kapsamlı ve verimli olacak şekilde ortaya konulması için dairesele silindir üzerinde çalışılmıştır ve plazma eyleyicinin ve ayırıcı plakanın model arkasında hız profiline ve modele etkileyen kuvvetlerin kontrolü üzerine etkisi araştırılmıştır. Özellikle, elektriksel ve geometrik plazma parametrelerinin plazma eyleyici üzerine etkileri üzerinde durulmuştur. Ayrıca, bu birleşik kontrol metodunun akış kontrolünün hangi sınırlara kadar uygulanabileceği araştırılmıştır.

BÖLÜM II

PLAZMA EYLEYİCİLER

Akış kontrolü, cisimler etrafında meydana gelen akışın gerek sistemde enerji kullanılarak ve gerekse sistemde enerji kullanılmadan cisimlerin geometrik şeklinde değişiklik yapılarak akış yapısının değiştirilmesi olayıdır. Cisimler etrafında akış oluşurken cisimler üzerinde kuvvetler meydana gelir. Örneğin, çeşitli akış kontrol tekniklerinin performansına bağlı olarak, cisme etki eden sürüklenme katsayısı değişebilmekte, bir uçağın manevra ve yük taşıma kabiliyeti arttırılabilmektedir.

İnnovatif akış kontrol mekanizmaları sayesinde kanat üzerindeki ihtiyaç olan ağır hantal cihazlar çıkarılabilir, bunun neticesinde yakıt tüketimleri ve emisyon salınımları azaltılabilmektedir.

Son yıllarda aktif akış kontrol yöntemleri arasında yaygın olarak kullanılmaya başlayan plazma eyleyicilerde, arasında dielektrik malzeme bulunan iki elektrotun birisi topraklanırken diğerine yüksek voltaj uygulanmaktadır. Bunun sonucunda yüzey üzerinde maddenin dördüncü hali olan plazma fazı oluşmakta ve bununla beraber yüzey etrafında iyon rüzgârları ve nötr parçacıklarla olan çarpışmalarla meydana gelen akışkan hareketi oluşmaktadır. Şekil 2.1’de çeşitli plazma eyleyicilerin geometrik gösterimi verilmiştir. Bu iyon rüzgârlarını akış kontrolünde kullanmak amacıyla plazma eyleyiciler geliştirilmiştir.

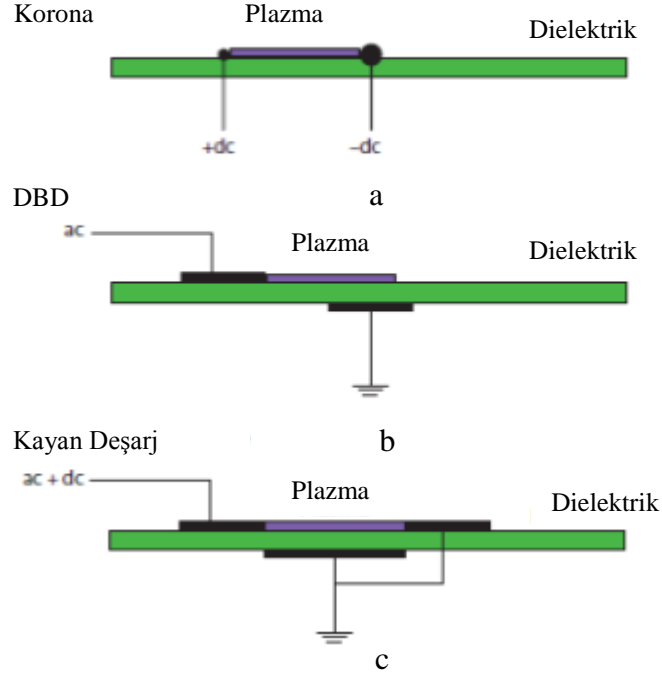
Roth’un (1998) yaptığı çalışmada, DC korona eyleyiciler birkaç m/s hızlarda akış oluşturmakta ve korona ark boşalmasından dolayı maksimum hız kısıtlanmaktadır. Ark oluşumunu önlemek amacı ile kısa dalgalı yüksek gerilimler kullanılmıştır. Diğer bir yaklaşım ise deşarj bölgesine dielektrik malzeme konulması esasına dayanmaktadır. Bu sayede ark oluşu engellenerek elektrik akımının ani boşalması önlenmektedir. Di-elektik nedeniyle DC yüksek voltaj kullanamamıştır. Bu nedenle DBD 50Hz ile 500kHz arası frekanslı AC yüksek gerilim ile uyarılmıştır.

Genel olarak atmosferik soğuk plazma eyleyicileri aşağıdaki gibi gruplandırabiliriz.

- Yüzey korona deşarjlı eyleyiciler (SCDA)

- Yüzey di-elektrik bariyer deşarj eyleyicileri (SDBDA)

Atmosferik soğuk plazma ozon üretimi amacı ile kullanılmaktadır. Aerodinamik akış kontrolü amacı ile SCD ve SDBD eyleyiciler kullanılmaktadır.



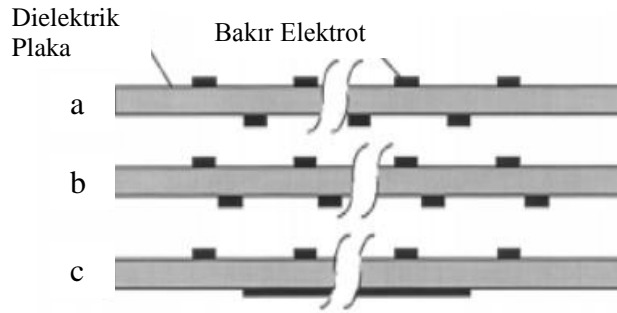
Şekil 2.1. En yaygın plazma eyleyicilerin geometrik gösterimleri; korona (a), di-elektrik bariyer deşarj (b), sliding deşarj eyleyiciler (c) (Cattafesta vd., 2011)

2.3.3 Yüzey Dielektrik Bariyer Deşarjlı Eyleyiciler (SDBDA)

Bu bölümde di-elektik bariyer deşarjlı (DBD) yüzeysel ve hacimsel plazma eyleyicileri anlatılmaktadır.

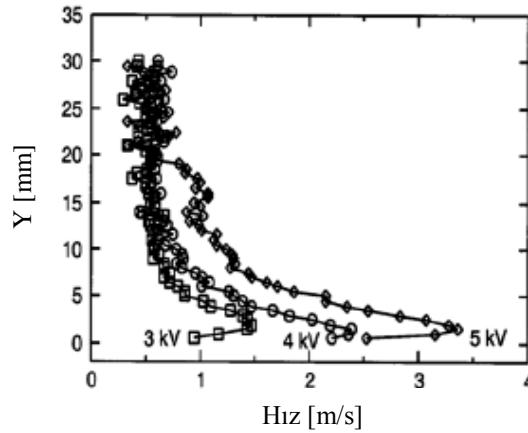
Hacimsel DBD'de birbirlerine bakan yüzeyleri dielektirk malzeme ile kaplanmış iki elektrotun arasındaki boşlukta hacim plazması oluşmaktadır. Bu elektrotlara yüksek voltaj ve frekans uygulanması neticesinde boşluktaki havanın kırılması ile plazma oluşumu sağlanmaktadır. Elektrotların yüzeylerinin dielektrik malzeme ile kaplanması sayesinde ark oluşumu engellenmekte ve düzgün parlak (glow) bir hacim plazması elde edilmektedir.

1980'lerin ortalarından sonra birçok çalışma DBD'nin fiziği üzerine yoğunlaşmıştır. 1990'lerin ortalarında, Roth'un grubu atmosferik basınçlı DBD geliştirmiştir. Bu yüzey DBD dielektrik malzemenin her tarafına asimetrik şekilde en az iki elektrotun konumlandırılmasıyla kurulmuştur. Roth ve arkadaşları 1994 yılında patentini almışlardır ve one atmosphere uniform glow discharge plazma (OAUGDP) olarak isimlendirmişlerdir. Şekil 2.2 Roth ve arkadaşları tarafından test edilen ilk üç konfigürasyonu göstermektedir ve ilk defa airfoil kontrolü için 1998 yılında sunulmuştur (Roth, 1998).



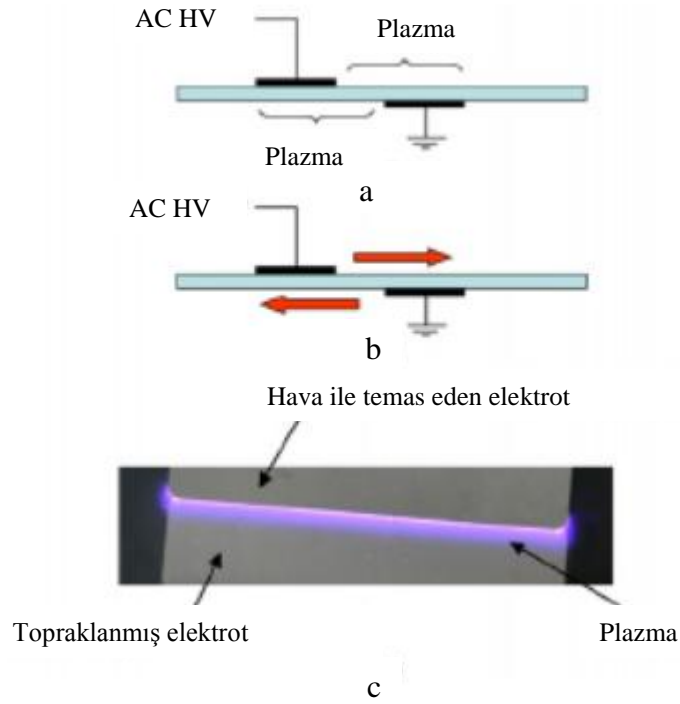
Şekil 2.2. Plazma panel şekilleri Simetrik (a), asimetrik (b) ve simetrik plate alt elektrot (c) (Timoth vd., 2009)

Roth vd. (2000) tarafından yapılan çalışmada, deşarjın etkisiyle yüzeye teğetsel oluşan hava akışının voltaja göre değişimi gösterilmiştir. Böylelikle meydana gelen kuvvet gerilimin artırılmasıyla 11 mN'a kadar çıkmıştır ve bu yapay akış serbest hava tabakasının akışını değiştirebildiğini göstermektedir. Örneğin, Şekil 2.3'de yüzey üzerindeki deşarjın etkilerini gösteren hız profili görülmektedir.



Şekil 2.3. OAUGDP etkisiyle durgun havada oluşturulan hız profili (Roth vd., 2000)

Bunun üzerine birçok geometrik konfigürasyonlar geliştirilerek DBD üretimi amaçlanmıştır. Genellikle bu eyleyiciler di-elektrik tabaka üzerine düzlemsel monte edilmiş iki elektrottan oluşmaktadır. Bir elektrot yüksek gerilimli AC ile uyarılırken diğer elektrot topraklanmıştır (Şekil 2.4a). Sürüm voltajında oluşan plazma tabakası dielektriğin her iki tarafında görülmüştür (Şekil 2.4b ve Şekil 2.4c). Plazmanın elektriksel ve mekanik özellikleri elektrot genişliğine (w_a ve w_b), elektrotlar arası boşluğa (g), di-elektrik malzeme kalınlığı (t) ve di-elektriğin özelliklerine bağlıdır.



Şekil 2.4. DBD 'nin yan görünüşünde plazma alanı (a), elektrik rüzgarı yönü (b) ve plazmanın üst görünüşü (c) (Roth, 2003)

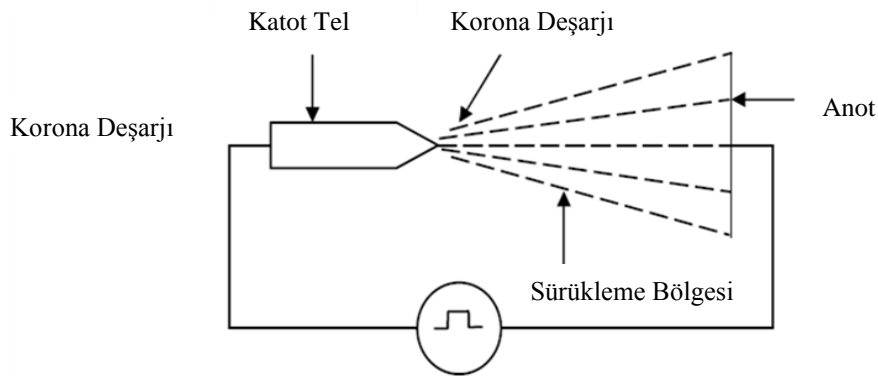
Elektrot genişliği farklı uzunluklarda olabilmekte ve elektrot boşluğu sifıra eşit ya da birkaç mm mesafeye kadar çıkabilmektedir. Kullanılan di-elektrik malzeme teflon, kapton, cam, seramik, veya pleksi-glass olabilmektedir. Bu di-elektrik malzemelerin kalınlığı 0.05mm ile birkaç mm arasındadır. Kalınlık, frekans ve dalga şekli oluşturulmak istenen plazmaya göre değişmektedir. Fakat en çok kullanılan frekans ve voltajlar birkaç kV'dan 30 kV'a kadar ve frekans birkaç kHz'den onlarca kHz'e kadar değişebilmektedir.

2.2 Yüzey Korona Deşarjlı Eyleyiciler (SCDA)

Korona yani yük boşaltımı, yüksek elektrik alanlarının sivri uçları, ince telleri, sac metal kenarlarını vb. çevrelediği alanlarda oluşturulmaktadır. 1atm basıncında oluşturulan koronanın endüstriyel uygulamaları için ince tel şekli daha sık kullanılmaktadır.

Korona DC uyarılma veya AC frekanslarında oluşturulabilir. Bir korona AC veya RF frekanslarından uyarıldığı zaman, pozitif ve negatif termalize edilmiş (bir parçacığın etkin hızının ısı bir değer ile değiştirilmesi) iyonların kaynak elektrottan dışarıya gönderilmesi şeklindedir (Şekil 2.5).

Korona deşarjı, uçak yüzeyindeki istenmeyen elektrik yüklerinin kaldırılması ve böylece aviyonik sistemlerin performansına kontrolsüz elektrik deşarjlarının zararlı darbe etkilerinden kaçınmayı sağlar, ozon imalatında, havuz suyunun sanitasyonunda, klima sistemlerinde elektrostatik çöktürücü olarak, doku kültürü için yüzey işleme, EHD iticiler ve iyonik rüzgar oluşumu gibi bir çok alanda kullanılabilir.



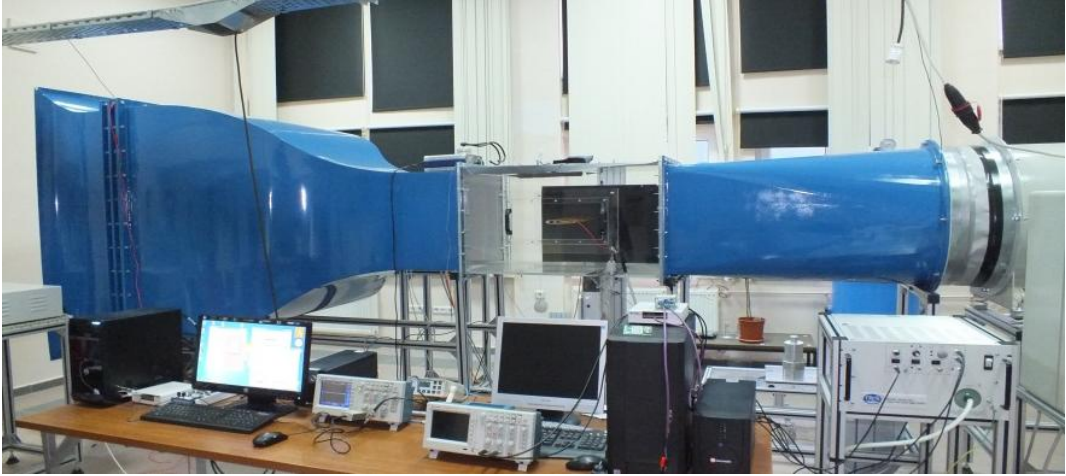
Şekil 2.5. Korona deşarjının gösterimi (Nehra vd., 2008)

BÖLÜM III

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Aktif, pasif ve birleşik akış kontrol mekanizmasının dairesel silindir etrafındaki akış kontrolüne etkisinin incelendiği bu çalışma, Niğde Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Aerodinamik Akış Kontrol Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Deney düzeneği (Fotoğraf 3.1) aşağıda verildiği gibi dört bölüm olarak ele alınmıştır.

- Deneylerin gerçekleştirildiği rüzgâr tüneli
- Plazma üretim cihazları ve sinyal üretimi
- Modelin hazırlanması ve eyleyicinin konumlandırılması
- Ölçüm sistemleri, veri toplama ve analiz işlemleri



Fotoğraf 3.1. Çalışmada kullanılan deney düzeneği

3.1 Rüzgâr Tüneli

Çalışılan rüzgar tüneli emmeli tip ve açık çevrimli olup ses altı hızlarda çalışan rüzgâr tünelidir. Rüzgâr tüneli giriş kanalı, akış düzenleyicisi, daralma konisi, test bölgesi, yayıcı, titreşim önleyici, fan, kontrol ünitesi ve çıkış hortumundan oluşmaktadır. Rüzgar tüneli çıkış kısmında bulunan fanın oluşturduğu negatif basınç nedeniyle giriş bölgesinde dış ortamdan hava çekilerek akış düzenleyiciye gönderilmektedir. Hava akışı, akış düzenleyici elekler ve 6,25:1 oranında daralma konisinden geçerek akışın türbülans

şiddeti düşürülmekte ve test bölgesi girişindeki serbest akışın üniform olması sağlamaktadır.

Hava akışı test modellerinin ve ölçüm elemanlarının konumlandırıldığı 570mm x 570mm kare kesite ve 1000mm uzunluğa sahip test bölgesine gelmektedir. Test bölgesi çıkışındaki 580x580mm kare kesiti dairesel kesite dönüştürmek ve fan çapına eşitlemek için bir dönüştürücü/yayıcı bulunmaktadır. Titreşim önleyici kullanılarak hem yayıcı ile fanın bağlantısı yapılmakta hem de fandan meydana gelen titreşimler bertaraf edilmektedir. Tünelde akışı sağlayan fanın motoru 4kW gücünde olup, 700mm çapa sahiptir. Tünelin içerisindeki hava, çıkış hortumundan atmosfere atılmaktadır. Test bölgesinde istenilen hızı elde etmek için fan motorunun devir sayısı elektrik akımı frekans dönüştürücüsü aracılığıyla kontrol edilmektedir. İstenilen hızın elde edilmesi için 0-50 Hz aralığında ve 0,1 Hz adıma sahip Telemecanique Altivar 71 marka (11kW) frekans dönüştürücü kontrol ünitesi kullanılmıştır.

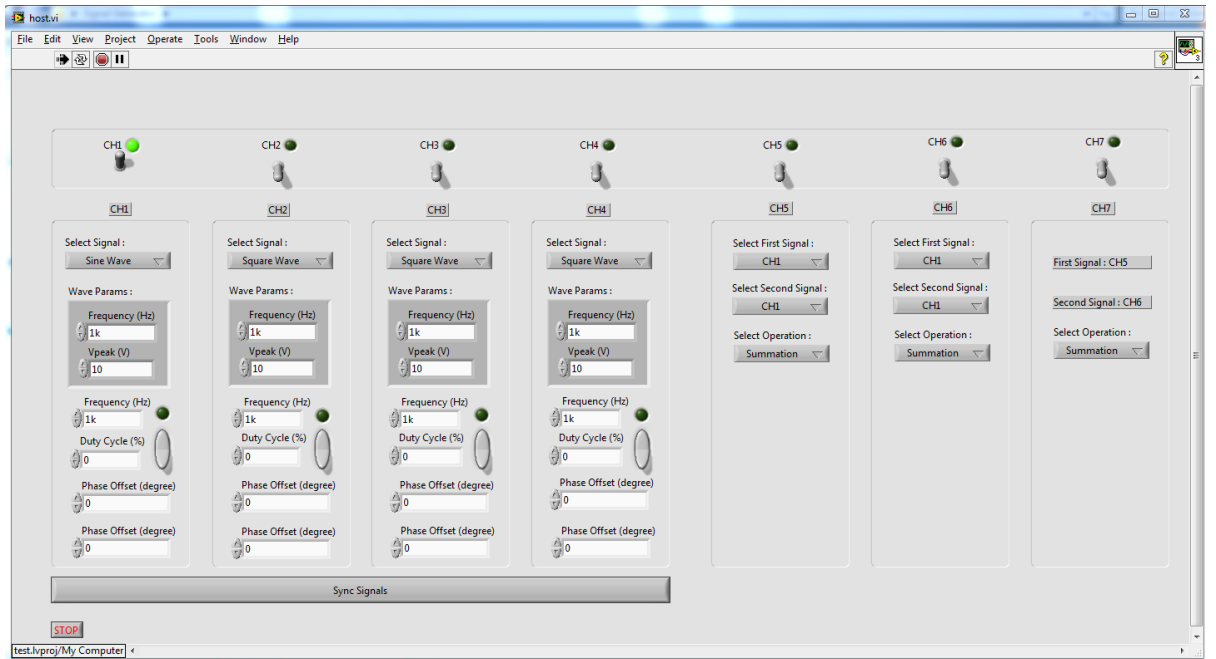
3.2 Plazmanın Oluşturulması

Plazmanın oluşturulabilmesi için iki elektrot arasına dielektrik malzemenin yerleştirilmesiyle bir elektrotta yüksek voltaj uygulanarak diğer elektrotu topraklanması ile ortamdaki gaz iyonize edilmesi gerekmektedir. Tez çalışmasında aktif akış yöntemi olarak kullanılan plazma yardımıyla dairesel silindir etrafındaki akışın kontrolünün sağlanmasına çalışılmıştır. Akış kontrolünde kullanılan plazma için farklı frekanslarda ve farklı voltajlarda çalışmalar yapılmıştır. Bu parametreleri uygulayabilmek için güç amfisine ihtiyaç duyulmaktadır. Fotoğraf 3.2’de bu çalışmada kullanılan TREK marka 20/20C-HS model yüksek voltaj amfisi görülmektedir. Cihaza gönderilen elektrik sinyali 2000V/V’luk çarpan ile yükseltilmektedir. Çıkış voltajının yükselme kabiliyeti ise 800 V/µs değerinde olup, 20 kHz’e kadar 0 ile ±20 kV arasında DC ya da pik AC olarak yüksek voltaj elde edilebilmektedir.

İstenilen sinyal formu FPGA tabanlı olarak geliştirilen arayüz programı (Fotoğraf 3.3) ile oluşturularak 16bit çözünürlüğe ve 200kHz örnekleme frekansına sahip NI PCIe-7841R model veri dönüşüm kartının analog çıkışından güç amfisine gönderilmiştir. Güç amfisine gönderilen sinyal yapısında değişiklik olmaksızın istenilen oranlarda yükseltilebilir voltaj plazma aktüatöre gönderilebilmektedir.

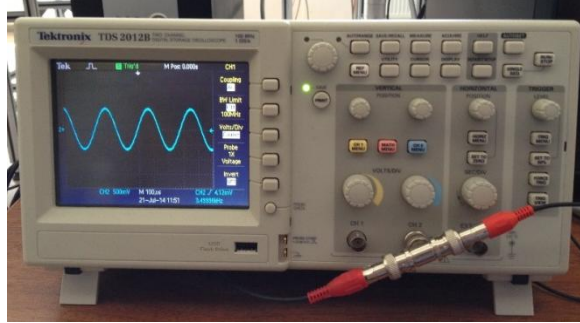


Fotoğraf 3.2. TREK MODEL 20/20C-HS yüksek voltaj amfisi



Fotoğraf 3.3. Sinyal üretiminde kullanılan FPGA tabanlı programın arayüzü

Güç amfisine gönderilen sinyal ve plazma aktüatördeki sinyalin yapısı Tektronix TDS2012B osiloskop ile ölçülmüş ve görselleştirilmiştir. Fotoğraf 3.4’de deneyde kullanılan osiloskop ve sinyal formlarının alınması görülmektedir.

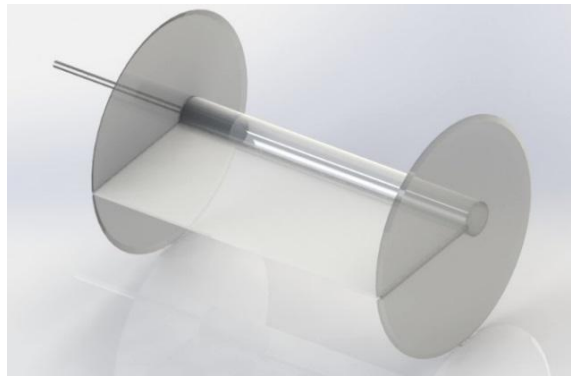


Fotoğraf 3.4. Osiloskopta sinyal formlarının incelenmesi

3.3 Test Modelinin Hazırlanışı

Test geometrisi dairesel silindir ve ayırıcı plakadan oluşmaktadır. Ancak test modelinin oluşturulmasında dairesel silindir ve ayırıcı plakalarla birlikte iki boyutlu akış şartlarını sağlayabilmek için uç plakalar kullanılmıştır. Ayrıca test modelinin rüzgar tüneline yerleştirilebilmesi için 10mm çapında model tutucu krom mil kullanılmıştır. Bu milin toplam uzunluğu 15cm olmakla birlikte 9cm’lik kısmı rüzgar tüneli içerisinde kalmaktadır.

Test modellerinin imalatından önce katı model tasarım çizimleri gerçekleştirilmiştir. İmalat öncesi tasarım yapılmasının sebebi daha sonra meydana gelebilecek hataları engellemektir. Fotoğraf 3.5’de test modelini katı model tasarım çizimi görülmektedir.



Fotoğraf 3.5. Dairesel silindirin katı model çizimi

Test modeli dört parça olarak pleksiglas malzemeden imal edilmiştir. Uç plakalar lazer ile kesilip parçalar üzerindeki işlemler CNC makinesinde yapılmıştır. Dairesel silindir iki boyutlu olarak inceleneceği için geometrinin sağ ve sol kenarlarına iki boyutlu akışın bozulmasını önlemek amacı ile 280mm çapa sahip iki adet uç plaka yerleştirilmiştir. Uç plakalar arasındaki mesafe 400mm'dir. Dairesel silindirin çapı 40 mm olup 4mm kalınlığındaki şeffaf pleksiglas borudan imal edilmiştir. Dairesel silindirin uç plakalar üzerine yerleştirilme konumu önden 100mm olarak belirlenmiştir. Test modeli rüzgar tüneli girişinin 310mm gerisinde tünel duvarındaki delikten yük hücresi bağlantı parçasına model tutucu mil ile bağlanmıştır. Kuvvet ve hız ölçümlerinde test modeli rüzgar tüneline düşey olarak, akış görüntülemesinde ise yatay olarak test bölgesi duvarının orta eksenine üzerine yerleştirilmiştir. Fotoğraf 3.6'da model üretildikten sonraki hali gösterilmektedir. Burada dairesel silindir ve ayırıcı plakalar üzerindeki plazma elektrotlarının konumları görülmektedir. Bu çalışmada sadece dairesel silindir üzerindeki elektrotlar aktif edilerek etkileri incelenmiştir.

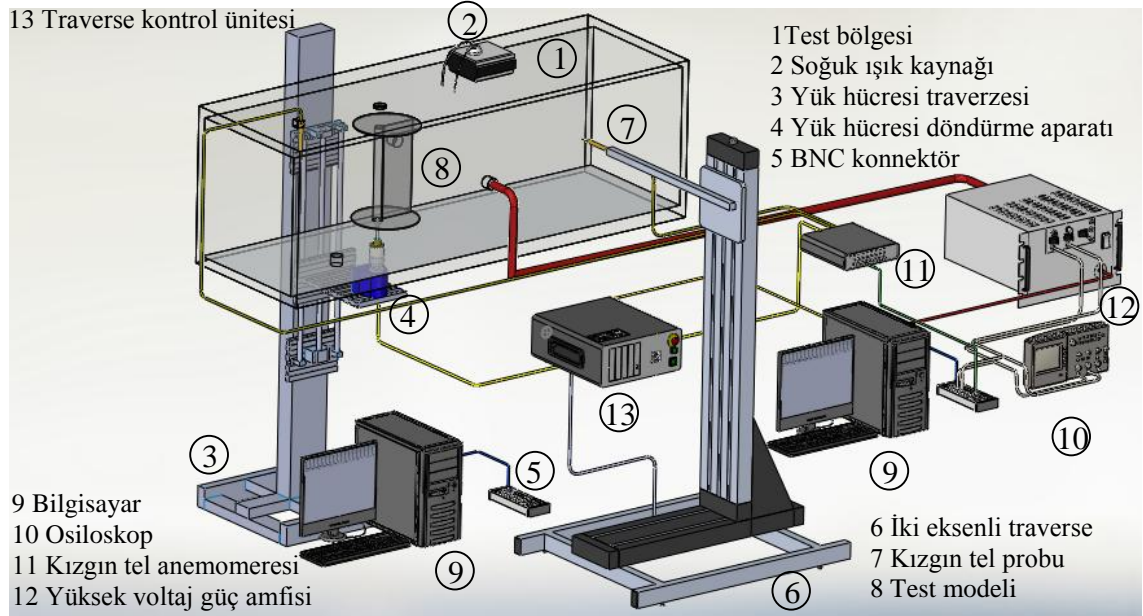


Fotoğraf 3.6. Dairesel silindirin model haline getirilmiş hali

3.4 Ölçüm Sistemleri

Plazma aktüatörlerin ve ayırıcı plakanın aerodinamik akış kontrolüne etkisini incelemek için üç farklı yöntem ile deneyler gerçekleştirilmiştir. Bunlar; yük hücresi kullanılarak

aerodinamik kuvvet katsayılarının tespiti, kızgın tel anemometresi kullanılarak modelin arkasındaki hız profilinin belirlenmesi ve dairesel silindir etrafında duman-tel yöntemi kullanılarak akış görüntülemesidir. Deney düzeneğinde kullanılan sistemlerin genel şeması Şekil 3.1’de verilmiştir.



Şekil 3.1. Rüzgar tüneli test bölgesinin ve deney sisteminin şematik görünümü

3.4.1 Aerodinamik kuvvet katsayılarının ölçümü

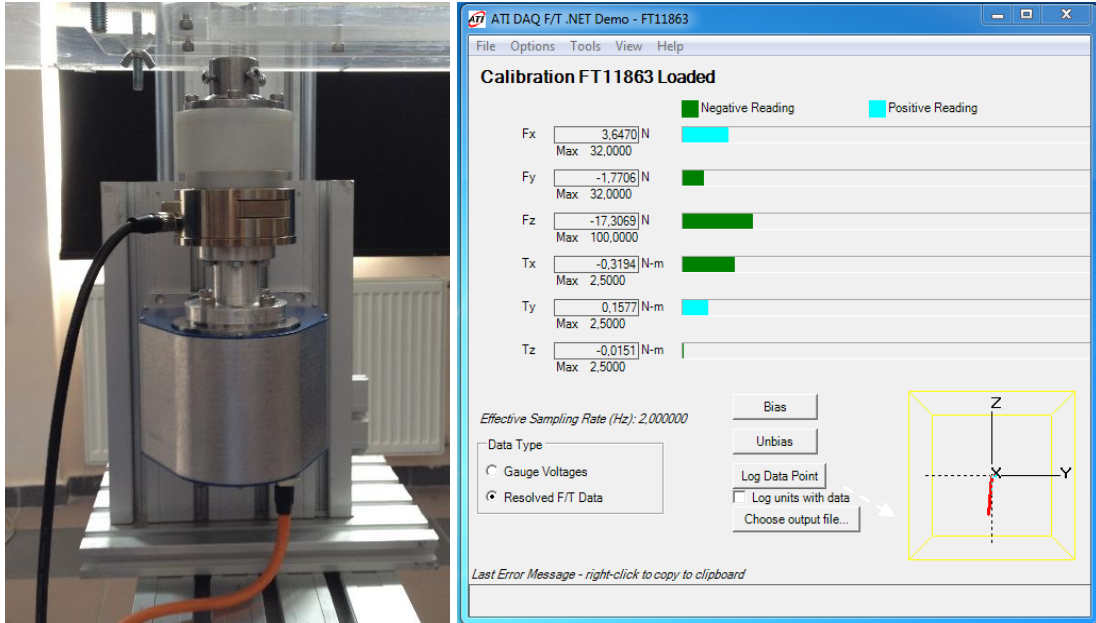
Bir akışkan katı bir cisim üzerinde hareket ettiğinde, yüzeye dik yönde basınç kuvvetleri ve cisim yüzeyi boyunca yüzeye paralel kayma kuvvetleri etki etmekte olup bu kuvvetlerin akış yönündeki bileşenine sürüklenme kuvveti ve akış yönüne dik etki eden bileşenine ise kaldırma kuvveti denilmektedir (Çengel ve Cimbala; 2008). Sürüklenme ve kaldırma kuvvetleri yoğunluk, hız ve yüzey alanına bağlı olarak değişmekte olup bunların boyutsuz ifade edilebileceği boyutsuz katsayılar C_L ve C_D olarak tanımlanmıştır. Kaldırma kuvvet katsayısı denklem 3-1’de; kaldırma kuvveti F_L , yoğunluk ρ , serbest akış hızı U_o ve üst bakış alanı $A_{üst}$ parametrelerine bağlı olarak ifade edilmiştir.

$$C_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2}\rho U_o^2 A_{üst}} \quad (3.1)$$

Sürüklenme kuvvet katsayısı ise 3-2 numaralı denklemde sürüklenme kuvveti F_D , yoğunluk ρ , serbest akış hızı U_o ve ön bakış alanı $A_{ön}$ parametreleri ile ifade edilmiştir.

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2}\rho U_0^2 A_{\delta n}} \quad (3.2)$$

Kaldırma ve sürüklenme kuvvetlerinin ölçümünde altı bileşenli ATI marka GAMMA model yük hücresi kullanılmıştır. Yük hücresi, F_x ve F_y kuvvetlerini $\pm 32\text{N}$, F_z kuvvetini $\pm 100\text{ N}$ ve M_x , M_y ve M_z momentlerini $\pm 2.5\text{Nm}$ aralığında ölçebilmektedir. Cihaz bilgisayar kontrollü döndürme aparatı üzerine entegre edilerek, döndürme aparatı ile geometrinin hücum açısı hassas olarak ayarlanabilmektedir. Yük hücresi x, y ve z eksenlerine uygulanan kuvvet ve momentleri hassas olarak ölçebilmektedir. Bu kuvvet ve momentlere ait belirsizlik değerleri tam skala üzerinden sırasıyla $\pm 0.75\%$, $\pm 1\%$, $\pm 0.75\%$, $\pm 1\%$, $\pm 1.25\%$ ve $\pm 1\%$ olarak kalibrasyon değerleri olarak verilmektedir. Fotoğraf 3.7a 'da yük hücresi ve döndürme ünitesi, Fotoğraf 3.7b' de ise kuvvet-balans sisteminin ara yüz programı görülmektedir.



a

b

Fotoğraf 3.7 : Döndürme aparatına entegre edilmiş yük hücresi (a) ve ATI yük hücresi programının ara yüzü (b)

Yük hücresinin yazılımı olan ATI programında verilerin toplanması istenilen frekansta ve ayarlanan süre boyunca yapılabilmektedir. Ölçümler 100 Hz frekansta alınmış olup her 50 ölçümün ortalaması alınarak saniyede 2 ölçüm kaydedilmiştir. Ölçümler 40 saniye sürmüş olup her bir deney için 80 veri alınmıştır. Her durum için en az 2 defa ölçüm

alınmıştır. Böylelikle deneylerin tekrarlanabilirliği ortaya konulmuş, ayrıca hata payı azaltılmaya çalışılmıştır.

Model etrafındaki akış rüzgar tüneli duvarları nedeniyle sınırlandırılacağından, model etrafındaki akış karakteristiğindeki değişimleri önlemek için blokaj oranı hesaplanmıştır. Blokaj cismin akışa dik iz düşüm alanının tünel kesit alanına oranı olarak tanımlanmaktadır. Bu çalışmada, blokaj oranı %5 olarak bulunmuştur. Apelt vd.'nin (1973) $10^4 < Re < 5 \times 10^4$ Reynolds değerlerindeki çalışmalarında dairesel silindirin blokaj oranının %6 olması durumunda blokaj düzelmesine gerek olmadığını belirtmişlerdir. Tez çalışmasında model için hesaplanan blokaj oranı literatürdeki benzer çalışmalarla aynı seviyede olduğundan dolayı hesaplamalarda herhangi bir düzeltme yapılmamıştır.

Dairesel silindirin sürüklenme katsayısı ölçümü 2D olarak dikkate alınacağı için çeşitli düzenlemeler yapılmıştır. Dairesel silindirin uçlarına yerleştirilen uç plakalar, dairesel silindiri tutan bağlantı çubuğu ve bağlantı çubuğu ile uç plakayı birbirine bağlayan cisim için oluşan kuvvetler ölçüm değerinden çıkarılarak dairesel silindir üzerine etki eden net sürüklenme kuvveti hesaplanmıştır. Bu hesaplama için kısaltmalar ve formül aşağıdaki gibidir;

F: Test modeline etki eden toplam kuvvet

F_{CC}: Dairesel silindire etki eden kuvvet

F_{OR}: Mil etki eden kuvvet

F_{DEP}: Mil ve üst uç plakaya etki eden kuvvet

F_{BEP}: Mil ve alt uç plakaya etki eden kuvvet

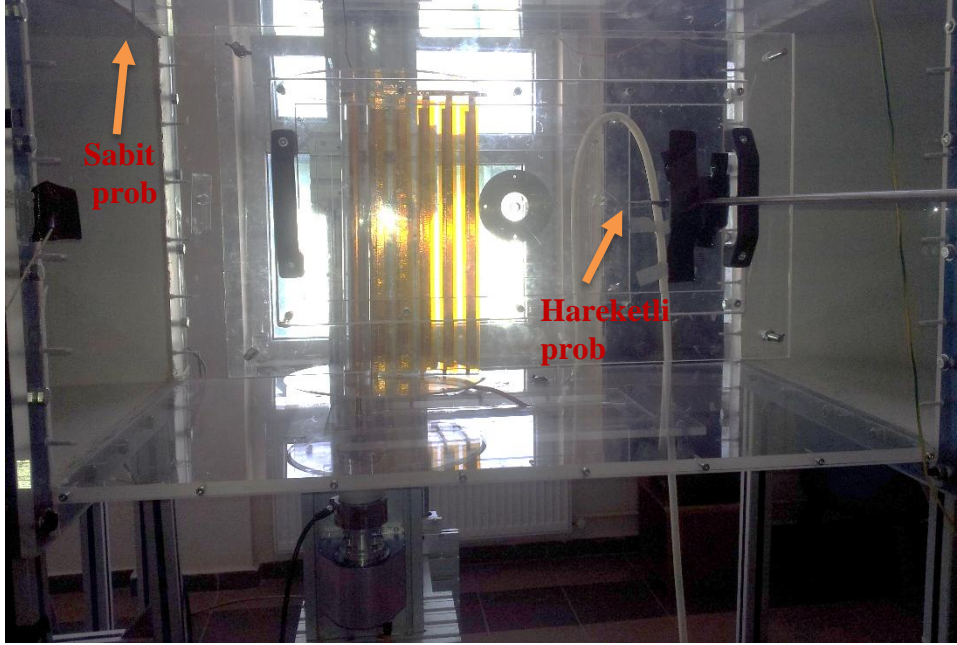
$$F_{CC} = F - (F_{BEP} + (F_{DEP} - F_{OR})) \quad (4.3)$$

Bu çalışmada yukarıdaki formül kullanılarak dairesel silindir-ayırıcı plaka üzerine etki eden net kuvvet hesaplanmaktadır.

3.4.2 Kızgın tel anemometresi ile iz bölgesi hız taraması

Test bölgesi serbest akış hızı ve model arkasında iz bölgesi hız dağılımı sabit sıcaklıklı kızgın tel anemometresi kullanılarak ölçülmüştür. Kızgın tel anemometresinin kontrolü mini CTA programı ile sağlanmıştır. Deneyler esnasında biri test modelinin iz bölgesinde

hız ve türbülans şiddetlerini ölçmede kullanılan ve traverse sistemi ile farklı istasyonlara hareket edebilen, diğeri ise test modelin önünde sabit olup serbest akış hızını ölçmede kullanılmak üzere toplam iki adet kızgın-tel probu kullanılmıştır (Fotoğraf 3.8).



Fotoğraf 3.8. Kızgın tel problemlerin test bölgesindeki konumları

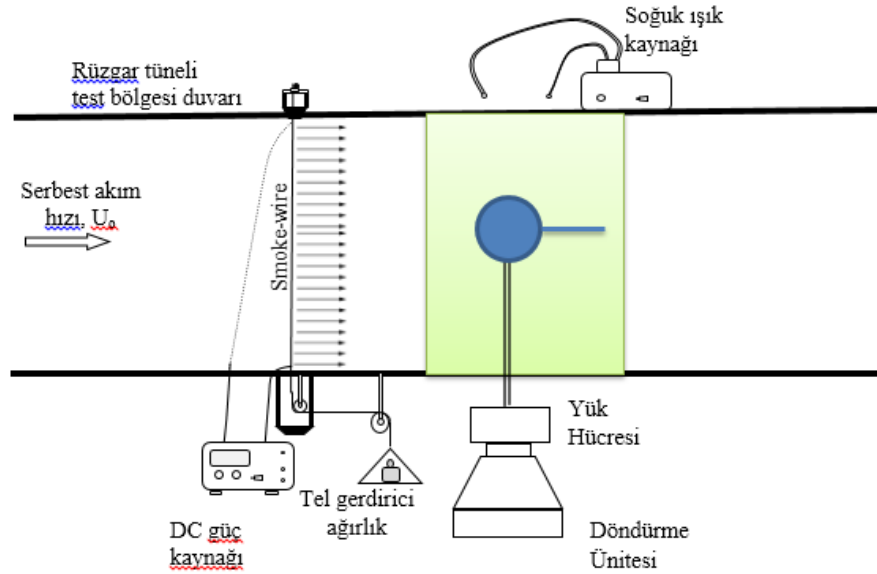
Kızgın tel anemometresine problemler co-axial kablolar ile bağlanmış olup kızgın tel anemometresinden veri toplama kartları ile veriler mini CTA programı kullanılarak bilgisayara aktarılmıştır. Ölçümlerde hareketli prob olarak Dantec 55P11 model kızgın-tel probu kullanılmış olup, bilgisayar kontrollü 2-boyutlu hareket (traverse) mekanizması ile test bölgesi içerisinde istenilen konumlara hassas bir şekilde yerleştirilmiştir. Serbest akış hızının ölçümünde de kendinden kablolu Dantec 55P16 probu kullanılmıştır. Model arkasında hız taraması yapılarak model arkasında oluşan hız alanı profili oluşturulmuştur. Bunun için hareketli prob dairesel silindirin arkasına 9D mesafeye yerleştirilmiştir. Probun bağlandığı hareket mekanizmasında oluşturulan grid yapısı sayesinde istenilen noktalarda ölçümler alınmıştır. Bu mesafeler 5mm, 10mm ve 20mm olmak üzere konuma göre hareket ederek 52 noktada hız ölçüm verileri alınmıştır.

İz bölgesinde elde edilen hız profili, tünel giriş hızına bölünerek hız dağılımı grafiklerinin normalizasyonu yapılmıştır. Öncelikle problemlerin kalibrasyon ölçümü yapılmış olup mini CTA programında problemlerin voltaj değerleri için kalibrasyon dosyası oluşturulmuştur. Bu

çalışmada plazma aktif iken yapılan deneylerde her bir ölçüm istasyonunda 2 kHz örnekleme frekansında 10000 veri alınarak deneyler gerçekleştirilmiştir. Bununla birlikte plazmasız deneylerde de ölçüm istasyonlarında 2 kHz örnekleme frekansında 16384 veri alınarak deneyler tamamlanmıştır. Ölçümlerde low-pass filtre değeri 1000Hz olarak kullanılmıştır.

3.4.3 Duman-tel yöntemi ile akış görüntülemesi

Bu çalışmada duman-tel (smoke-wire) yöntemi ile akış görüntülemesi yapılmış olup sistemin şematik gösterimi Şekil 3.2’de verilmiştir. Bu yöntemde direnci yüksek iletken bir tel üzerine sıvı parafin damlatılmakta ve elektrik akımı verilerek sıvının buharlaşması sağlanmaktadır. Tel ısıtılmadan önce damlatılan parafin küçük tanecikler olarak tel üzerinde tutunmaktadır. Daha sonra uygulanan voltaj ile ısıtılan tel parafini buharlaştırıp akışla birlikte hareketinden beyaz görünümlü duman çizgileri model üzerinden akmakta ve akışın izlediği yolu takip etmektedir. Bu sayede modelin bulunduğu alanın görüntülenmesi ile model etrafındaki akış yapısı hakkında bilgi edinilebilmektedir.



Şekil 3.2. Duman-tel akış görüntüleme sistemi şeması

BÖLÜM IV

BULGULAR VE İRDELEMELER

Bu bölümde yapılan deneysel ölçümlerden elde edilen sonuçlar sunulmuştur. Dairesel silindir üzerinde oluşturulan plazma ve dairesele silindirin arkasına yerleştirilen ayırıcı plaka yardımı ile akış kontrol deneyleri gerçekleştirilmiştir. Burada incelenen model düzenlemeleri;

1-Tek dairesele silindir (TDS),

2- Tek dairesele silindir üzerinde yüzey plazması ile akış kontrolü (TDSYP),

3- Dairesel silindir ve ardına yerleştirilen ayırıcı plaka (DSAP) ve

4-Dairesel silindir üzerine yerleştirilen plazma ile ardına yerleştirilen ayırıcı plaka (DSAPYP) olup, bu dört farklı durum için hız alanı ve sürüklenme kuvvetinin karşılaştırması yapılmıştır.

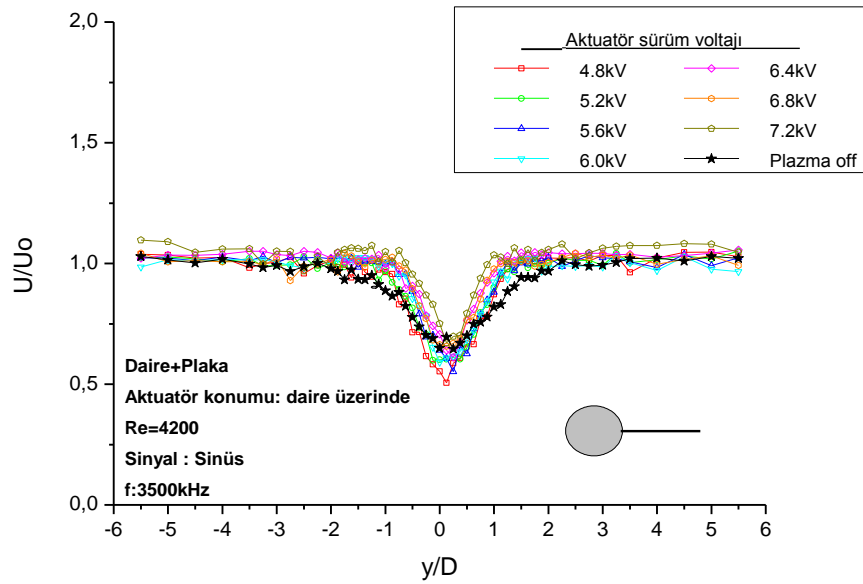
İlk önce oluşturulan plazma için plazma sürüm voltajının ve frekansının etkisi iz bölgesinde hız profilleri ve girdap kopma frekanslarının elde edildiği hız spektrum grafikleri ortaya konulmuştur. Ayrıca di-elektrik malzeme etkisine bakılarak sabit voltaj değerleri için akış yapısı incelenmiştir. İncelenen diğer bir parametre ise yük hücresi ile kuvvet ölçümü alınarak plazmanın sürüklenme kuvveti üzerine etkisinin belirlenmesi olmuştur. Son olarak akış görüntülemesi sayesinde aktif, pasif ve birleşik akış kontrol metodunun etkileri gözlemlenmiştir.

4.1 Farklı Voltaj Değerleri İçin Yapılan Deneyler

Dairesel silindir üzerine akış eksenine göre $\theta=90^\circ$ olacak şekilde elektrot çifti döşenmiştir. Ayrıca dairesele silindir arkasına ayırıcı plaka dairesele silindirin merkez eksenine hizasında olacak şekilde konumlandırılmıştır. Burada hem aktif akış kontrol metodu (plazma aktüatör) hem de pasif akış kontrol metodu (ayırıcı plaka) yani birleşik akış kontrol yöntemi kullanılmıştır. Aynı genişliğe sahip 5mm eninde elektrot çiftleri arasında çift kat ve tek kat olacak şekilde Kapton dielektrik malzemesi kullanılmıştır. Fotoğraf 4.1'de elektrot dizilişlerinin genel görünümü verilmiştir. Ayırıcı plaka üzerinde elektrot döşemesi yapılmış olmakla birlikte yapılan ön deneylerde ele alınan mevcut

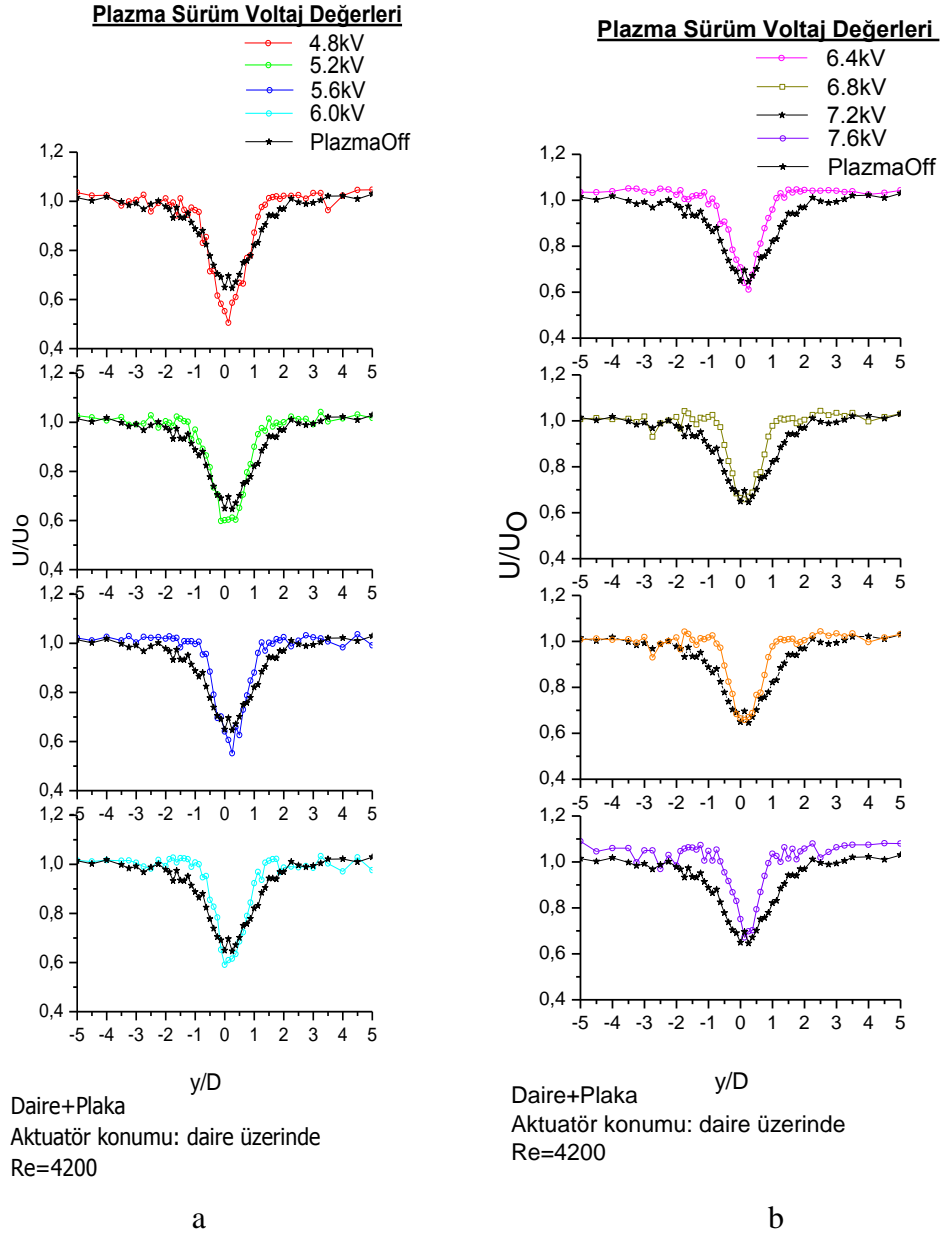
parametreler için etkisi gözlemlenemediğinden bu çalışmada kullanılmamıştır. Hız taramalarında kızgın tel probu dairesel silindir merkezinden 9D uzaklığa yerleştirilerek ölçümler alınmıştır. Bu konum ayırıcı plakanın arka uzcundan 4.75D geride kalmaktadır.

Burada ilk olarak düşük voltaj değerleri için etkinin çok küçük olduğu görülmüş ve girdap gerginliğinin arttığı gözlemlenmektedir. Fakat uygulanan voltaj değerleri arttıkça iz bölgesindeki daralma net olarak ortaya çıkmıştır. Bu etkinin 6kV ve üzeri değerler için daha net olduğu bulunmuştur. İz bölgesindeki daralmanın özellikle basınç kaynaklı sürüklenme kuvvetini azaltacağı bilinmektedir.



Şekil 4.1 : Farklı voltaj değerleri için dairesel silindir arkasındaki hız profili

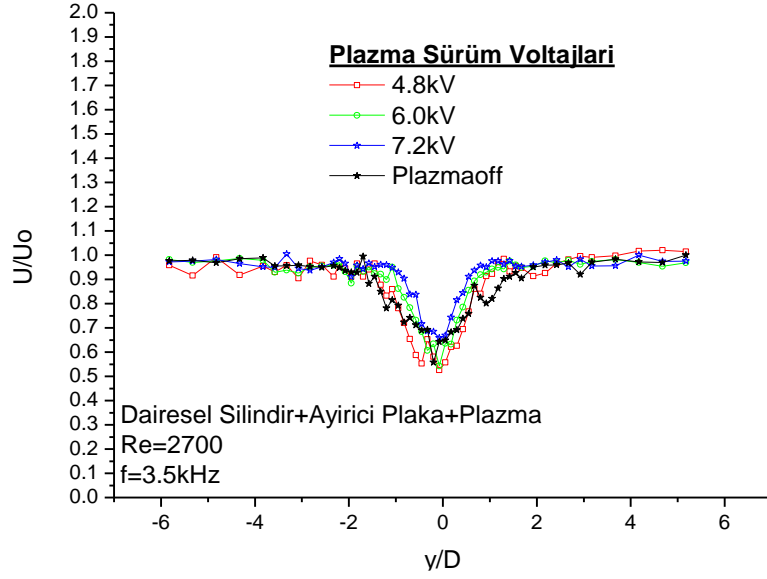
Şekil 4.2a'da ve Şekil 4.2b'de verilen grafikler Şekil 4.1'de verilen hız profilinin daha detaylı gösterimi için oluşturulmuştur. Uygulanan her bir voltaj değeri için plazma oluşturulmamış durumun karşılaştırılması yapılmıştır. Aşağıdaki grafiklerden de daha net bir şekilde anlaşılacağı üzere voltaj değeri arttıkça iz bölgesindeki alan daha da daralma göstermiştir. Fakat elektrotların dairesel silindir üzerine döşenmesinden dolayı voltaj değeri belirli bir değerden sonra iz bölgesini daralması üzerine etkisi olmamıştır. Çünkü, Reynolds sayısının alt kritik bölgesinde dairesel silindir için akışın ayrılma noktası $\theta=70^{\circ}$ - 80° civarlarında olmaktadır (Akansu, 2004). Elektrotlar $\theta=90^{\circ}$ 'ye döşendiği için dairesel silindir yüzeyinden ayrılan akış maksimum olarak yüzeye yapıştırılmıştır.



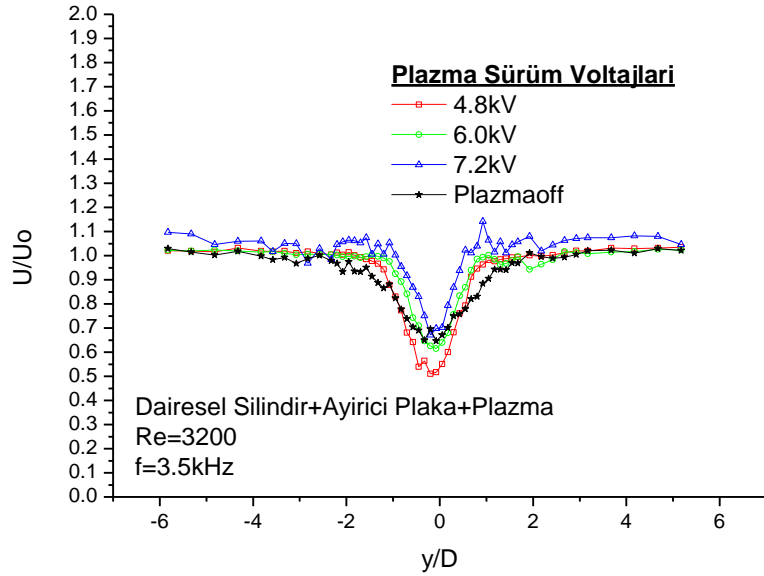
Şekil 4.2. Plazma sürüm voltaj değerleri (a) 4.8kV, 5.2kV, 5.6kV,6kV (b) 6.4kV,6.8kV, 7.2kV, 7.6kV

Voltajın etkisinin farklı Reynolds sayılarındaki etkisini ortaya koyabilmek için $Re=2700$, 3200, 3800 ve 4200 değerlerinde $V=4.8$, 6.0, ve 7.2kV için alınan ölçümlerin grafikleri sırasıyla Şekil 4.3, Şekil 4.4, Şekil 4.5 ve Şekil 4.6’da verilmiştir. Yüksek hız değerleri için dairesel silindir arkasında oluşan hız profillerinin düşük hız değerlerindeki hız profillerine göre daha düzgün bir yapıda olduğu gözlemlenmektedir. Bu durum, rüzgar tüneli çıkışının atmosfere verilmiş olması nedeniyle düşük hızlarda dış ortam şartlarından daha fazla etkilenilmesinden kaynaklanmaktadır. Ayrıca uygulanan voltaj değeri arttıkça plazmanın etkisinin akış kontrolündeki etkisinin arttığı tüm grafiklerden anlaşılmaktadır.

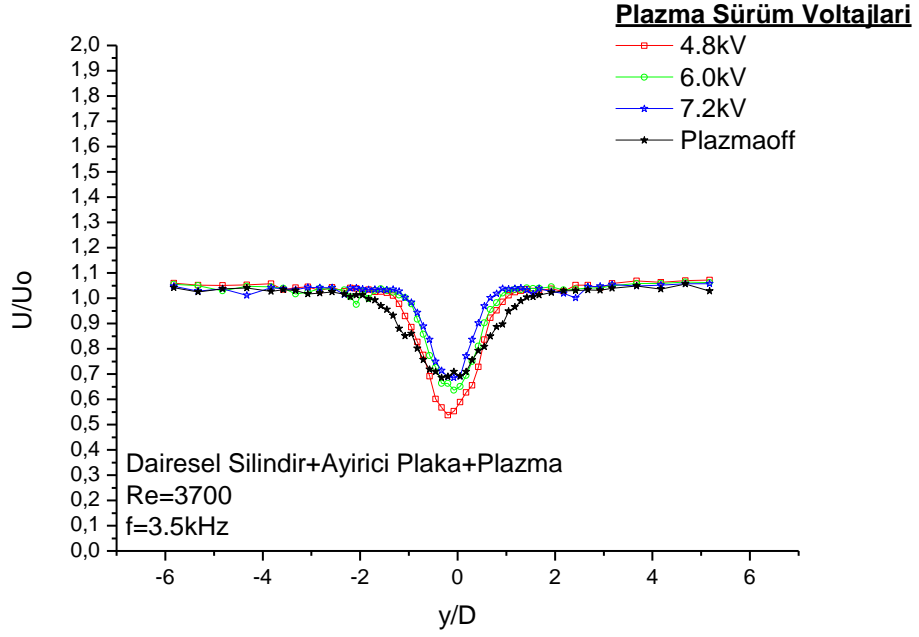
Özellikle Şekil 4.6’da 7.2kV değerinde elde edilen plazma akış kontrolünün, plazmanın kapalı olduğu duruma göre iz bölgesinde sağladığı daralma net olarak görülmektedir.



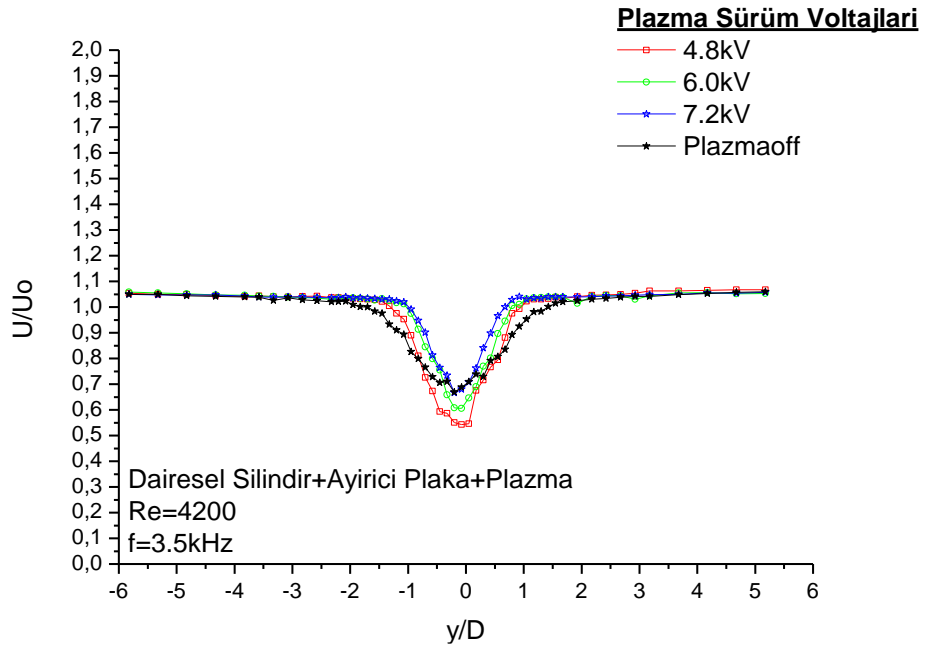
Şekil 4.3. $Re = 2700$ değeri için $V = 4.8kV, 6.0kV, 7.2kV$ voltaj değeri için dairesel silindir arkasındaki iz bölgesinin gözlemlenmesi



Şekil 4.4. $Re = 3200$ değeri için $V = 4.8kV, 6.0kV, 7.2kV$ voltaj değeri için dairesel silindir arkasındaki iz bölgesinin gözlemlenmesi



Şekil 4.5. Re = 3700 değeri için V = 4.8kV, 6.0kV, 7.2kV voltaj değeri için dairesel silindir arkasındaki iz bölgesinin gözlemlenmesi



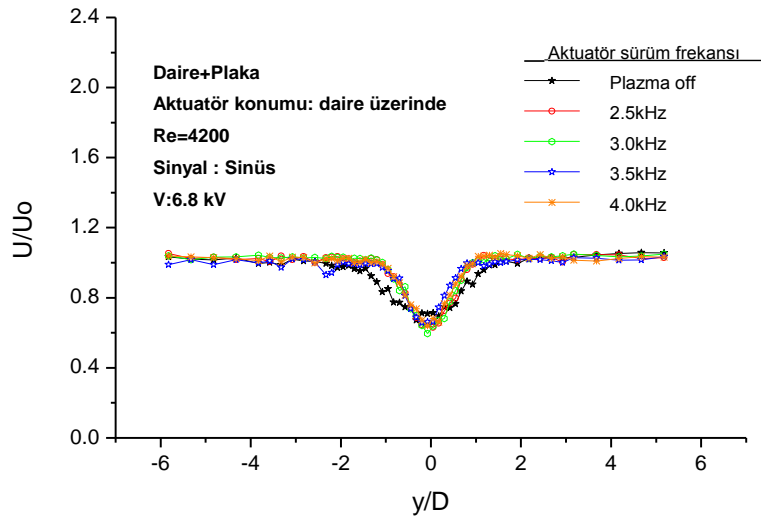
Şekil 4.6. Re = 4200 değeri için V = 4.8kV, 6.0kV, 7.2kV voltaj değeri için dairesel silindir arkasındaki iz bölgesinin gözlemlenmesi

Yukarıdaki dört grafikte de görüldüğü üzere uygulanan voltaj değeri V=4.8kV ve V=6.0kV iken oluşan girdap caddesindeki girdapların dayanıklılıkları ve düzenliliği artmıştır. Bu yüzden de grafiklerde iz bölgesindeki dairesel silindirin arka kısmını ifade eden kısım plazmanın kapalı olduğu duruma göre daha aşağıda çıkmıştır ancak dairesel silindir üzerindeki akışın ayrılma açısının geciktirilmesinden dolayı yine de iz bölgesi

küçülmüştür. Tüm grafiklerde yine görülmektedir ki uygulanan voltaj değeri $V=7.2\text{kV}$ iken dairesel silindir arkasındaki iz bölgesinde elde edilen minimum hız plazmanın kapalı olduğu durumda elde edilen minimum hız ile aynı seviyede kalmasına rağmen iz bölgesi genişliği neredeyse yarı yarıya daralmıştır. Bu sonuçlardan, daha küçük bir iz bölgesinin oluşturulmasına bağlı olarak dairesel silindirin sürüklenme katsayısının azaldığı anlaşılmaktadır.

4.2 Farklı Plazma Sürüm Frekans Değerleri İçin Yapılan Deneyler

Plazma aktüatörün açık ve kapalı olduğu durumda, $Re=4200$ değerindeki sabit voltaj değerinin $V=6.8\text{kV}$ olduğu farklı plazma sürüm frekansları için dairesel silindirin arkasındaki hız profili Şekil 4.7’de görülmektedir. Plazmanın etkisi ile bütün frekanslarda iz bölgesindeki iyileşme yani daralma net bir şekilde görülmektedir. Fakat bu çalışmada uygulanan farklı frekanslara göre, frekans değişiminin plazmanın etkisi üzerinde bir artış göstermediği gözlemlenmiştir.

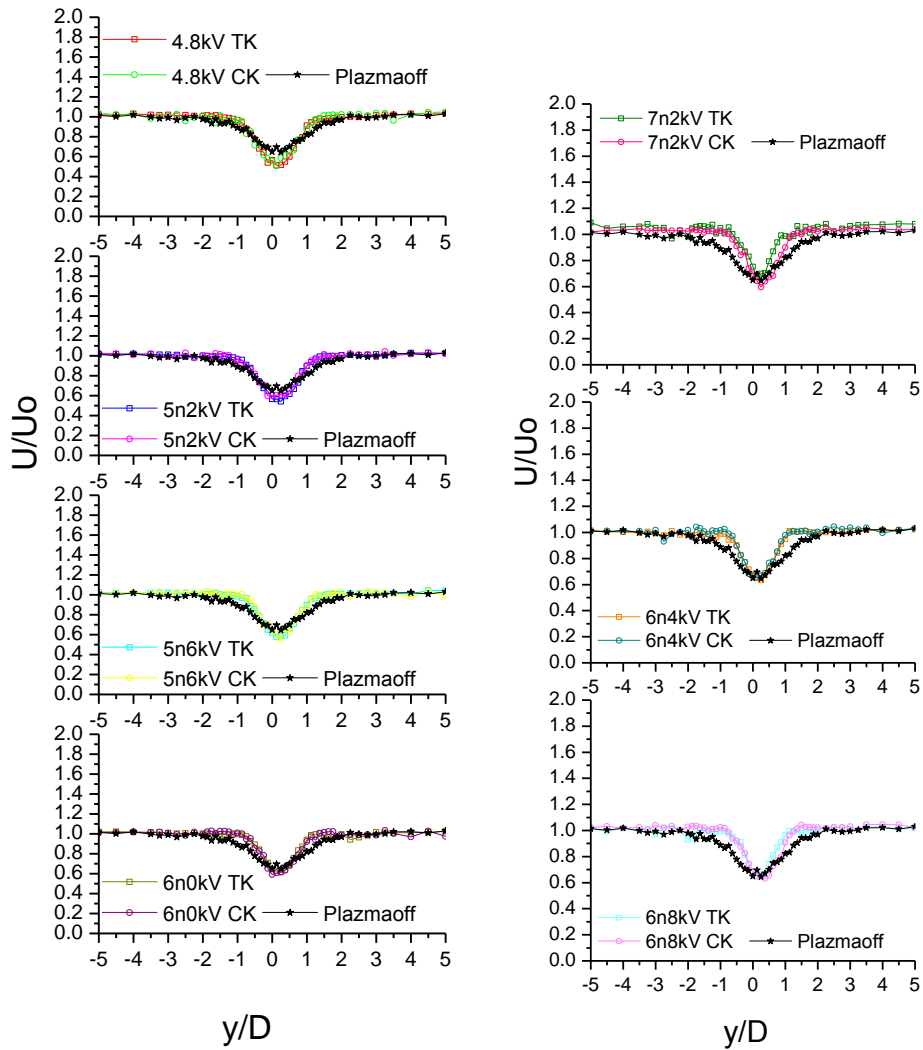


Şekil 4.7. Farklı frekans değerleri için dairesel silindir arkasındaki hız profilinin gösterimi

4.3 Farklı Di-Elektrik Malzeme İçin Yapılan Deneyler

Oluşturulan plazmanın akış kontrolüne etkisinin artırılması için plazma oluşumuna etki eden parametrelerden bir tanesi olan di-elektrik katsayısı faktörü bu kısımda incelenmiştir. Di-elektrik katsayısı faktörünün göz önüne alındığı bu çalışmada, dairesel silindirin iz bölgesinde iyileşmeye olduğu gözlemlenmiştir. Şekil 4.8’de elektrotlar

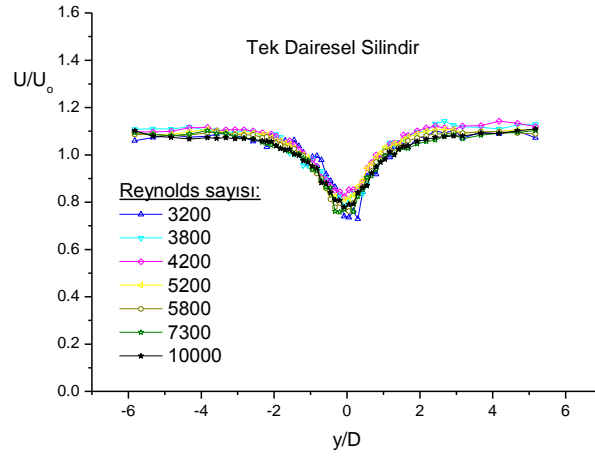
arasına döşenen di-elektrik malzemenin kalınlığının iz bölgesi üzerindeki etkisi görülmektedir. Tek kat döşenmiş Kapton di-elektrik malzemesi için düşük voltajlarda elde edilen iz bölgesindeki daralma çift kat döşenmiş Kapton di-elektrik malzemesi ile elde edilememektedir. Düz levha üzerinde yapılan çalışmalarda levha üzerinde elde edilen duvar jetinde aynı etkiyi gözlemleyebilmek için daha yüksek voltajları uygulamaya ihtiyaç duyulduğu bilinmektedir. Bu çalışmada plazmanın silindir üzerindeki sınır tabakaya türbülans üretici benzeri bir etki yapması nedeniyle plazmanın üretilebildiği voltaj değerinin elde edilmesi ile dielektrik malzeme kalınlığından bağımsız olarak yaklaşık aynı akış kontrol etkisi elde edilmiştir.



Şekil 4.8. Elektrotlar arasına döşenen di-elektrik malzemenin kalınlığının iz bölgesi üzerindeki etkisinin incelenmesi

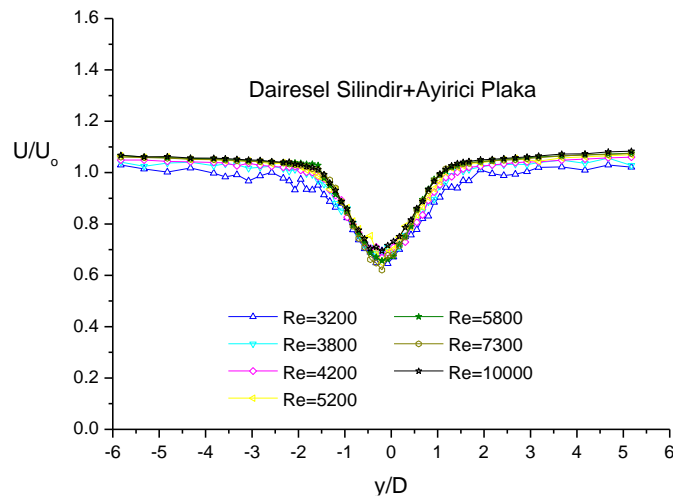
4.4 Tek Dairesel Silindir Ve Akış Kontrolü Durumlar İçin Yapılan Deneyler

Şekil 4.9'da dairesel silindirin tek başına kullanıldığı durumda iz bölgesinin tespiti için farklı Reynolds sayılarında ölçümler alınmıştır. İz bölgesi genişliğinin y/D aralığının yaklaşık olarak -2.5 ve $+2.5$ aralığında olduğu görülmüştür.



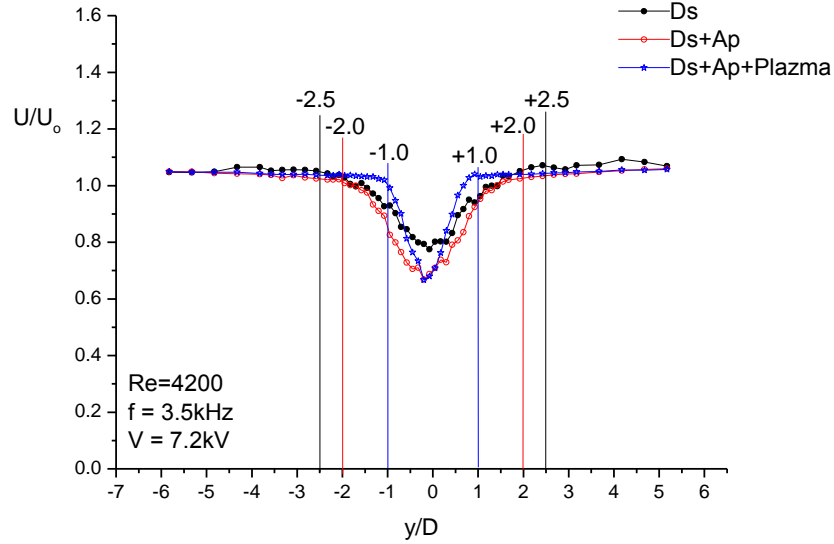
Şekil 4.9. Dairesel silindirin tek başına kullanıldığı durum için hız profili taraması

Şekil 4.10'da dairesel silindirin ayırıcı plaka ile kullanıldığı durumda iz bölgesinin tespiti için aynı Reynolds sayılarında ölçümler tekrar edilmiştir. Bu durumda iz bölgesi genişliğinin y/D 'nin yaklaşık olarak -2 ve $+2$ aralığında olduğu görülmüştür. Yani ayırıcı plaka kullanıldığı için iz bölgesinde daralma gözlemlenmiş olup dairesel silindirin sürüklenme katsayısını azaltmaktadır.



Şekil 4.10. Dairesel silindir ve ayırıcı plaka kullanımı için hız profili taraması

Şekil 4.11'de kullanılan akış kontrol yöntemleriyle ve bu yöntemler olmadan iz bölgesinin değişimi görülmektedir. $Re=4200$ olduğu durumda alınan ölçümler için uygulanan voltaj değeri $V=7.2kV$ ve uygulanan sürüm frekansı $f=3.5kHz$ olarak belirlenmiştir. Burada görüleceği üzere hem aktif hem de pasif kontrol yönteminin uygulanması iz bölgesi genişliğinin önemli ölçüde daralmasına neden olmuştur.

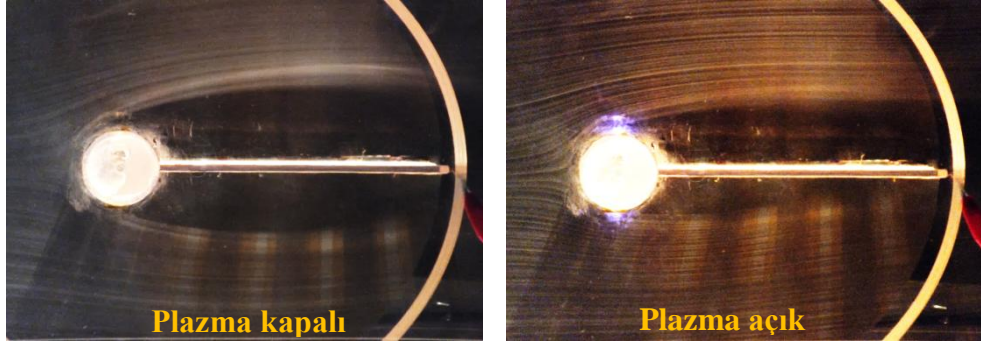


Şekil 4.11. Farklı akış kontrol yöntemleri için iz bölgesinin incelenmesi

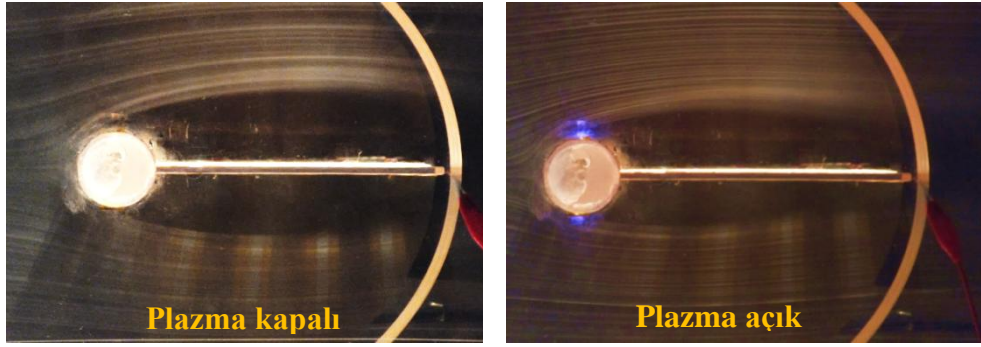
Dairesel silindir herhangi bir akış kontrol metodu olmaksızın kullanıldığında akış ayrılması silindirin daha önünden başlamakta ve girdap oluşumu daha kısa mesafede gerçekleşmektedir. Yalnızca dairesel silindir kullanıldığı durum için y/D oranı -2.5 ve $+2.5$ aralığında çıkarken ayırıcı plaka eklendiğinde iz bölgesinin iyileşmesi -2.0 ve $+2.0$ aralığına kadar daralmıştır. Eğer yöntemi birleşik akış kontrol metodu haline getirirsek yani plazma aktüatör de eklenirse sisteme iz bölgesi için y/D oranı -1.0 ve $+1.0$ aralığına kadar daralmaktadır.

Tez çalışmasına hazırlık olarak akış görüntülemesinin yapıldığı bir ön çalışma gerçekleştirilmiştir (Akbiyık H., ve diğ., 2014). Bu çalışmada, pasif akış kontrol yöntemi (ayırıcı plaka) ve aktif akış kontrol yöntemi (plazma aktüatör) birlikte kullanılmıştır. Farklı Reynolds sayılarında, dairesel silindir etrafındaki akış ayırıcı plaka üzerine yerleştirilen plazma aktüatörler kullanılarak kontrol edilmiştir. Duman-tel yöntemiyle akış görüntülemesi yapılmıştır. Dairesel silindirden ayrılan akış tabakasının ayırıcı plaka üzerindeki tutunma konumunun ve girdap oluşum bölgesi akış yapısının plazma aktüatör

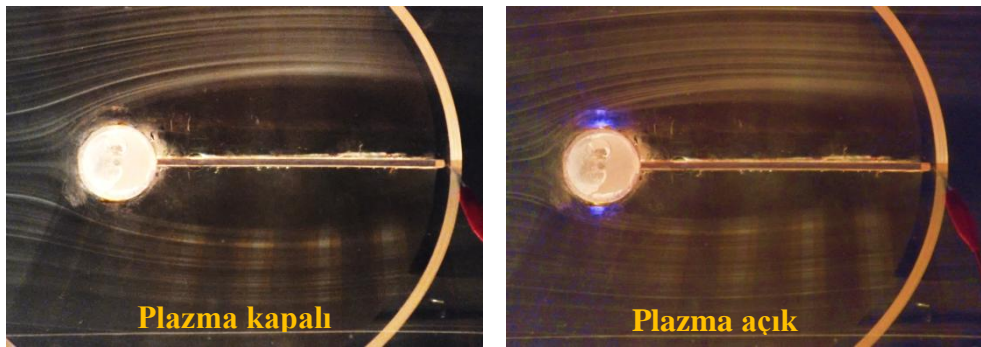
yardımıyla iyileştirilmesine çalışılmıştır. Elde edilen sonuçlarda, birleşik akış kontrol yönteminde dairesel silindirin iz bölgesinin daraldığı gözlemlenmiştir. Bununla birlikte ayırıcı plaka girdap oluşum bölgesini uzatırken, aynı zamanda plazma aktüatöründe akış ayrılma noktasını geciktirdiği ve buna bağlı olarak iz bölgesinin daha da daralarak levha üzerinde tutunmasını sağladığı gözlemlenmiştir.



a) $Re=2400$



b) $Re=3450$



c) $Re=4000$

Fotoğraf 4.1. $V=6kV_{pp}$, $f=3.5kHz$ 'de uygulanan akış kontrolünün iz bölgesi akış yapısı üzerine etkisinin görüntülenmesi (Akbiyık vd., 2014)





















4.5 Kuvvet Ölçümü İçin Yapılan Deneyler

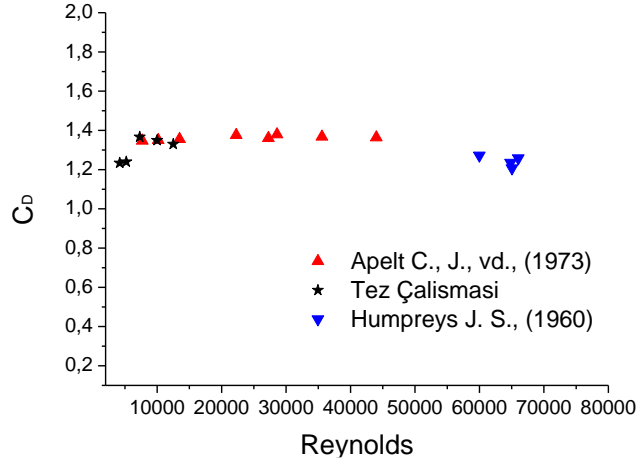
Burada, yapılan kuvvet ölçümlerden hesaplanan sürüklenme kuvvet katsayısı sonuçları sunulmuştur. Çizelge 4.1’de $Re=4200, 5200, 7300, 10000$ ve 12500 değerleri için TDS, TDSYP, DSAP ve DSAPYP durumlarındaki sürüklenme katsayıları hesaplanmış ve Çizelge 4.1’de sunulmuştur. Tek dairesel silindir durumunda elde edilen kuvvet değerleri Şekil 4.12’de literatürle karşılaştırılmıştır. Özellikle $Re=7500$ değerinden sonra elde edilen sonuçların Apelt (1973) tarafından elde edilen sonuçlarla uyum içinde olduğu görülmektedir.

Çizelge 4.1’deki değerler karşılaştırıldığında tüm Reynolds sayıları için ayırıcı plaka ve plazma aktüatörün yani birleşik akış kontrol yönteminin (DSAPYP) uygulanması durumunda elde edilen sürüklenme kuvveti, tek dairesel silindir (TDS) ve aktif veya pasif kontrolün tek başına uygulandığı durumlara göre daha düşük olarak elde edilmiştir. Tek dairesel silindir-yüzey plazması (TDSYP) durumunda, çalışılan tüm Reynolds değerlerinde voltaj değeri arttıkça sürüklenme katsayısının tek dairesel silindirin sürüklenme katsayısına göre azaldığı gözlemlenmiştir. Reynolds sayısının 4200 ve 5200 değerlerinde tek başına aktif akış kontrolü (TDSYP), tek başına pasif akış kontrol yönteminden daha etkili olmaktadır. Ancak, Reynolds sayısının 7300 ve yukarıdaki değerlerde elde edilen sürüklenme katsayısının pasif kontrol olan dairesel silindir-ayırıcı plaka (DSAP) durumuna göre daha iyi sonuç verdiği görülmüştür.

$Re=4200$ değerinde, tek dairesel silindir durumunda sürüklenme katsayısı 1.23 olarak elde edilirken, birleşik akış kontrol yönteminin (DSAPYP) kullanılması durumunda sürüklenme katsayısı plazma sürüm voltajı $8kV$ iken 0.36 değerine düşmekte olup yaklaşık %70’lik bir azalmaya karşılık gelmektedir. Reynolds sayısının $5200, 7300, 10000$ ve 12500 değerlerinde $8kV$ ’luk plazma sürüm voltajının uygulanması durumunda sürüklenme kuvvetindeki azalma miktarı sırasıyla %51, %48, %44 ve %44 olarak elde edilmektedir. Pasif akış kontrol yöntemi bütün Reynolds sayılarında tek dairesel silindire göre yaklaşık aynı seviyede sürüklenme kuvvetini azaltırken, aktif kontrol yönteminin etkisi artan Reynolds ile birlikte giderek azalmaktadır. Aktif akış kontrolünün uygulandığı durumlarda (TDSYP ve DSAPYP) plazma sürüm voltajının artması sürüklenme kuvvetindeki azalma miktarını artırmaktadır.

Çizelge 4.1. Modellerin kuvvet ölçümünün uygulanan voltaj değerine ve Reynolds sayısına göre değişiminin gösterimi

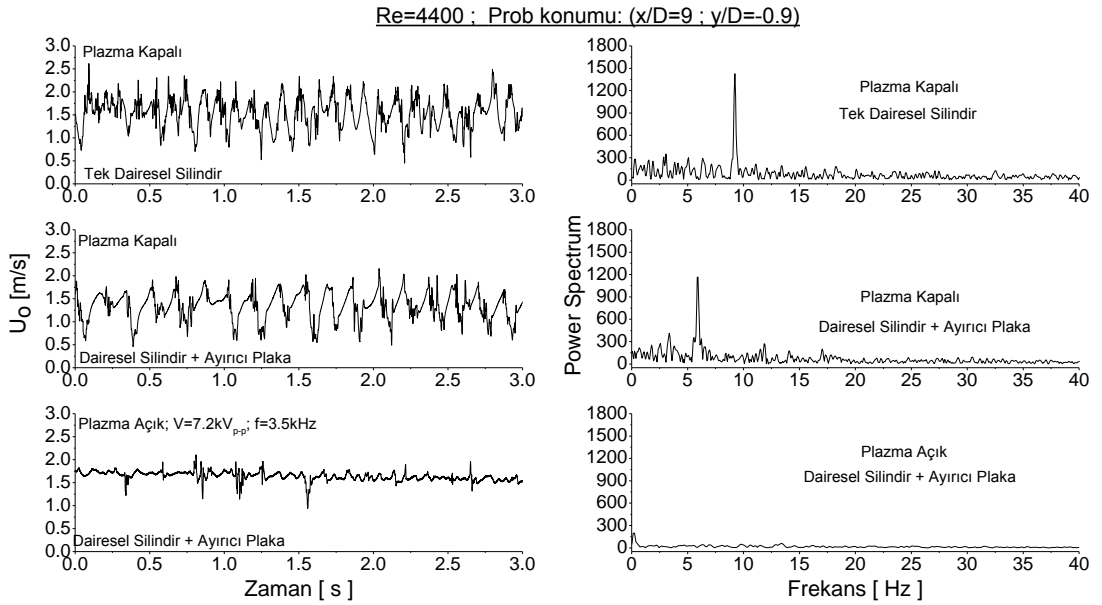
Reynolds	Model	Sürüklenme Katsayısı [C_D]		
		6kV	8kV	10kV
4200	 PK	1,234		
		1,01	0,73	0,35
		0,9024		
		0,2766	0,3652	0,3597
5200	 PK	1,2399		
		1,13	0,76	0,73
		0,8963		
		0,7377	0,6055	0,6584
7300	 PK	1,3668		
		1,3	1,09	0,92
		0,92		
		0,8551	0,7	0,63
10000	 PK	1,3495		
		1,35	1,13	0,98
		0,9		
		0,84	0,76	0,74
12500	 PK	1,33		
		1,32	1,1	0,98
		0,85		
		0,81	0,74	X



Şekil 4.12. Dairesel silindir için çeşitli Reynold sayılarındaki sürüklenme katsayılarının literatür ile kıyaslaması

4.6 İz Bölgesi Güç Spektrum Dağılımları ve Girdap Kopma Frekansları

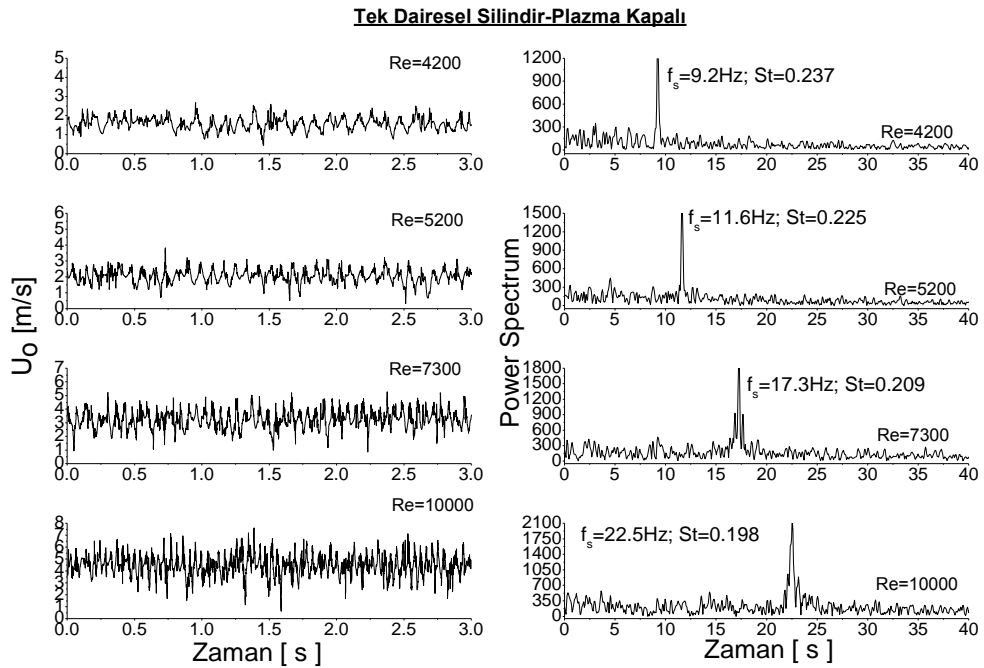
Tek dairesel silindire (TDS), pasif akış kontrol (DSAP) ve birleşik akış kontrol (DSAPYP) durumlarında etki eden girdap karakteristiklerini belirlemek için modellerin arka kısımlarında elde edilen hız ölçümünden spektral analizi yapılmıştır. Şekil 4.13'de $Re=4400$ değerinde TDS, DSAP ve DSAPYP modelleri için hareketli probun $x/D=9$ ve $y/D=0.9$ konumunda alınan hız ölçümleri ve güç spektrum analizi grafikleri görülmektedir.



Şekil 4.13. TDS, DSAP ve DSAPYP modelleri için $x/D=9$ ve $y/D=0.9$ konumunda elde edilen, hız zaman geçimişi (a) ve güç spektrumu (b) dağılımları ($Re=4400$)

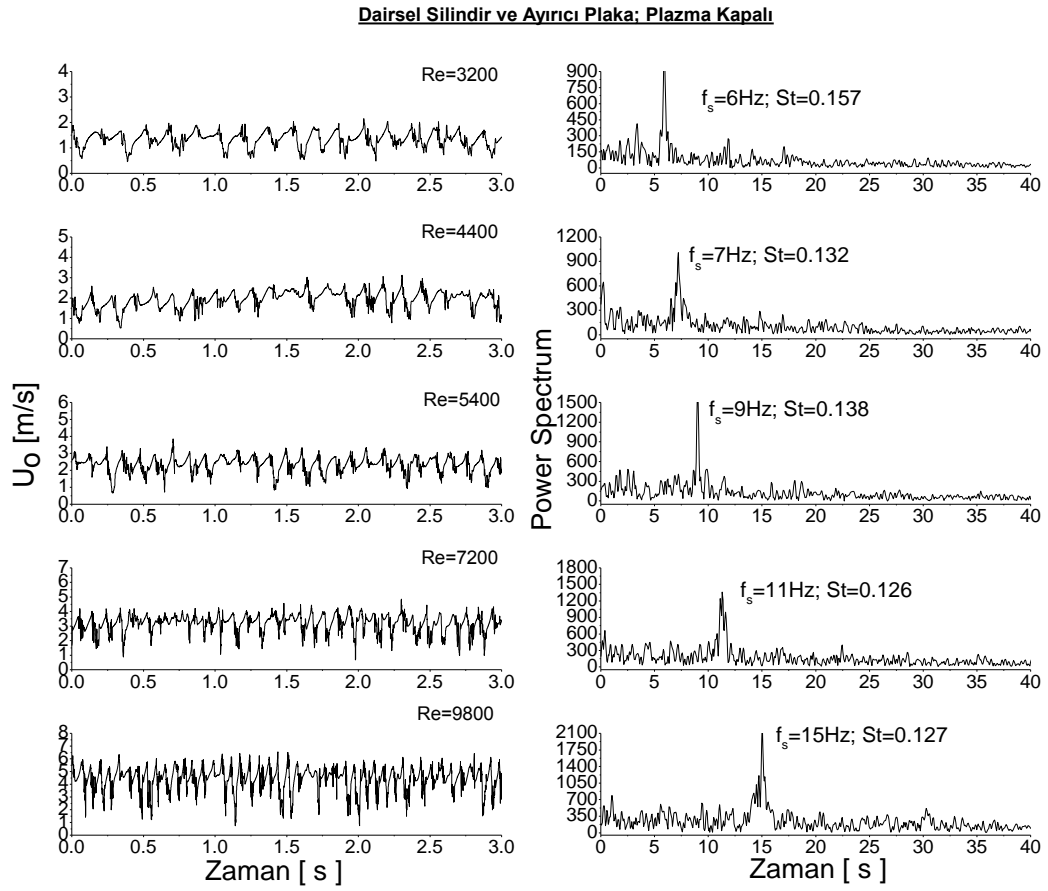
Şekil 4.13a’da TDS modeli için düzenli olarak kopan girdaplar hız geçmişinde periyodik olarak salınımlara neden olmakta iken DSAP modeli için girdap kopma frekansı düşmekte ve daha büyük girdaplar oluşmaktadır. Bununla birlikte plazma aktif hale geldiğinde (DSAPYP) düzenli girdap oluşumunun tamamen engellendiği ve az sayıda oluşan girdaplarında daha küçük boyutlu olarak gerçekleştiği anlaşılmaktadır. Şekil 4.13b’de güç spektrum analizi göz önüne alındığında tek dairesel silindirden kopan girdap şiddeti en fazla ve 9Hz civarında oluşuyor iken dairesel silindir ardına ayırıcı plaka yerleştirilmesi ile hem girdap kopma frekansı 6Hz civarına düşmektedir hemde girdap şiddetinin azaldığı görülmektedir. Plazmanın aktif hale getirilmesi ile oluşan girdapların neredeyse tamamen sönümlenmesi ve düzenli girdapların oluşmaması nedeniyle frekans boyutunda herhangi bir pik değer gözlemlenmemektedir.

Şekil 4.14’de tek dairesel durumunda Reynolds sayısına bağlı olarak girdap kopmaları nedeniyle oluşan hız çalkantıları ve girdap kopma frekansları görülmektedir. Artan Reynolds sayısı (serbest akış hızı) nedeniyle birim zaman da kopan girdap sayısı artmakta olup hız çalkantılarının şiddeti büyümektedir. Burada $Re=10000$ değerinde Strouhal sayısı 0.198 olarak elde edilmiştir. Bu değer aynı Reynolds sayısında elde edilen literatürdeki 0.2 değeri ile uyumaktadır (Akansu, 2004).



Şekil 4.14. Tek dairesel silindir modeli için $x/D=9$ ve $y/D=0.9$ konumunda elde edilen a)Time-History ve b)Power spectrum ölçümleri

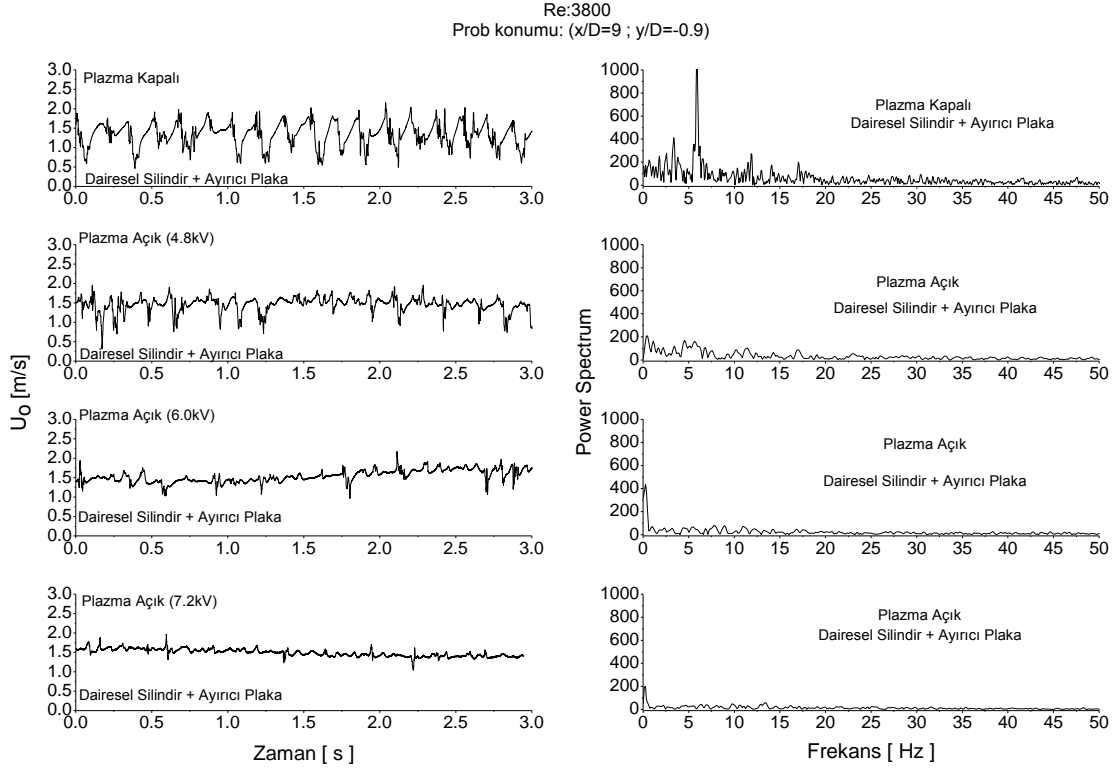
Şekil 4.15’de dairesel silindirin arkasına yerleştirilen ayırıcı plakanın etkisi ile $x/D=9$ ve $y/D=0.9$ konumundan elde edilen hız çalkantıları ve girdap kopma frekanslarını görmektedir. Şekil 4.14’de verilen hız ve spektrum dağılımlarına benzemekle birlikte girdap kopma frekansı önemli oranda düşmekte ve budurum girdap oluşum yapısındaki değişimi ortaya koymaktadır. $Re=10000$ değerinde tek dairesel silindirde 0.198 olarak elde edilen St sayısı, $L=3.75D$ uzunluğundaki ayırıcı plakanın etkisi ile 0.127 değerine düşmekte ve %36’lık bir azalmaya karşılık gelmektedir.



Şekil 4.15. Dairesel silindir ardına yerleştirilen ayırıcı plaka modeli için farklı Reynolds sayılarında $x/D=9$ ve $y/D=0.9$ konumunda elde edilen a)Time-History ve b)Power spectrum ölçümleri

Şekil 4.16’da ayırıcı plakanın ve plazma eyleyicinin beraber kullanıldığı birleşik akış kontrolünün etkisi $Re=3800$ için sunulmuştur. Plazmanın kapalı olması durumunda ayırıcı plakalı dairesel silindiri arkasından periyodik olarak kopan girdaplar, plazmanın aktif hale getirilmesiyle bozulmaya başlamaktadır. Plazma sürüm voltajının 4.8kV olduğu durumda düzenli girdap oluşumu engellenmiş olup, düzensiz ve daha küçük

boyutlu girdapların üretilmesi nedeniyle spektral boyutta baskın tek bir pik oluşmamaktadır. Voltajın daha da artırılmasıyla düzeniz olarak girdaplarda daha fazla baskı altına alınarak girdap oluşum mekanizması neredeyse tamamen ortadan kalmaktadır.



Şekil 4.16. DSAP ve DSAPYP modelleri için $Re=4400$ 'de farklı voltaj değerlerinde $x/D=9$ ve $y/D=0.9$ konumunda elde edilen a)Time-History ve b)Power spectrum ölçümleri

BÖLÜM V

SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında, dairesel silindir etrafındaki akışın kontrolü için pasif akış kontrol yöntemi olan ayırıcı plaka ile aktif akış kontrol yöntemi olan plazma eyleyici hem birlikte hem de ayrı ayrı kullanılmıştır. İlk önce, tek dairesel silindirin akış yapısı göz önüne alınmış ve iz bölgesi incelenmiştir. Daha sonra dairesel silindirin merkez eksenine pasif akış kontrol yöntemi olan ayırıcı plaka yerleştirilerek akış yapısı iyileştirilerek sürüklenme kuvvet katsayısının azaltılmasına çalışılmıştır. Aynı zamanda cisimden kopan girdap caddesi ayırıcı plaka yardımı ile daha arka mesafede oluşmuştur. Daha sonra, aktif akış kontrol yöntemi olan plazma eyleyicinin elektrotları dairesel silindirin akışın yönünde $\theta=90^\circ$ 'lik konumunda olacak şekilde yerleştirilmiştir. Aktif akış kontrolünün hem tek dairesel hem de ayırıcı plakalı model üzerine etkisi test edilmiştir.

Dairesel silindir etrafındaki akış kontrolünün sağlanmasında kullanılan birleşik akış kontrol yöntemi için elektriksel parametrelerin incelenmesi sonucunda, bu çalışma için voltajın etkisi arttıkça iz bölgesinin daraldığı gözlemlenmiştir. Fakat, akış kontrolü için ele alınan çalışma aralığındaki frekansın ve dielektrik sabitinin bir etkisi olmadığı gözlemlenmiştir. Dairesel silindirin iz bölgesindeki daralma en fazla birleşik akış kontrol yönteminin uygulanması ile sağlanmıştır.

Tüm Reynolds sayıları için ayırıcı plaka ve plazma aktüatörün yani birleşik akış kontrol yönteminin (DSAPYP) uygulanması durumunda elde edilen sürüklenme kuvveti, tek dairesel silindir (TDS) ve aktif veya pasif kontrolün tek başına uygulandığı durumlara göre daha düşük olarak elde edilmiştir. Sürüm voltajındaki artışın sürüklenme kuvvetindeki iyileşmeyi arttırdığı gözlemlenmiştir. Reynolds sayısı arttıkça aynı voltaj değerinde sürüklenme kuvvetinde elde edilen iyileşme giderek azalmıştır. Bu nedenle daha yüksek Reynolds sayılarında aktif akış kontrol yönteminin etkili olabilmesi için yüksek voltaj değerinde artırılması gerekmektedir. Bu çalışmada birleşik akış kontrol yönteminin uygulandığı en düşük Reynolds sayısı olan 4200 değerinde, sürüklenme kuvvetindeki azalma %70 seviyelerinde olurken, en büyük Reynolds sayısı olan 12500 değerinde azalma miktarı %40 mertebelerine kadar gerilemektedir.

Aktif akış kontrol yönteminin etkisi ayrıca akış görüntülemesi yardımı ortaya konulmuştur. Ayırıcı plakanın etkisi ile girdap oluşum bölgesi dairesel silindirin daha arka kısma kayarken silindirden ayrılan kayma tabakaları iz bölgesini daralmasına neden olmaktadır. Plazmanın etkisi ile akış ayrılma noktasının geciktirilmesi nedeniyle iz bölgesinin daha da daralması söz konusu olmaktadır.

KAYNAKLAR

Akansu, Y.E., Yavuz, T. ve Sarioglu, M., “Flow around a rotatable circular cylinder–plate body at subcritical Reynolds numbers”, *AIAA Journal* 42-6, 1073-1080, 2004.

Akansu, Y. E., ve Fırat, E., “Control of flow around a square prism by using synthetic jet”, *10nd Experimental Fluid Mechanics Conference*, Liberec, November 2010.

Akansu, Y. E., Karakaya, F., Şanlısoy, A., “Active control of flow around NACA 0015 airfoil by using DBD plasma actuator”, *EFM 2012-Experimental Fluid Mechanics Conference*, Hradec Kralove, Czech Republic, Conference Proceeding, s. 27-33, 2012.

Akbiyık, H., Akansu, Y. E., Karakaya, F., “Flow control around the circular cylinder using plasma actuators placed on the splitter plate”, *1st International Plasma Technologies Congress*, Kayseri, April 2014.

Apelt, C.J., West, G.S., ve Szewczyk, A.A., “The effects of wake splitter plates on the flow past a circular cylinder in the range $10^4 < Re < 10^4$ ”, *Journal of Fluid Mechanics* 61, 187-198, 1973.

Ardelean, E.V., McEver, M.A., Cole, D.G. ve Clark, R. L., “Flutter suppression using V-stack piezoelectric actuator”, *AIAA* 44, 2003.

Azar, K., “Lighting the way for LED development”, Design World, http://www.designworldonline.com/lighting-the-way-for-led-development/#_, 2012.

Bao, Y., Tao, J., “The passive control of wake flow behind a circular cylinder by parallel dual plates”, *Journal of Fluids and Structures* 37, 201-219, 2013.

Bera, J.C., Michard, M., Grosjean, N. ve Comte-Bellot, G., “Flow analysis of two dimensional pulsed jets by particle image velocimetry”, *Experiments in Fluids* 31, 519-532, 2001.

Cattafesta III, L.N. ve Sheplak, M., “Actuators for active flow control”, *Annu. Rev. Fluid Mech.* 43, 2010.

Cattafesta III, L.N. ve Sheplak, M., “Actuators for active flow control”, *Annu. Rev. Fluid Mech.* 43, 247-272, 2011.

Coleman, H.W. ve Steele, W.G., “Experimentation and uncertainty analysis for engineers”, 2nd ed., *John Wiley&Sons*, New York, 1998.

Crittenden, T.M., Glezer, A., Funk, R., ve Parekh, D., “Combustion-driven jet actuators for flow control”, *31st AIAA Fluid Dyn. Conf.*, Anaheim, Calif., AIAA Pap., 2001-2768, 2001.

Engle, A.V., Seeliger, R. ve Steenback, M., “On the glow discharge at high pressure”, *Z. fur Physic.* 85,144–60, 1933.

Gad-el-Hak, M., “Flow control: passive, active, and reactive flow management”, *Cambridge University Press*, New York, 2000.

Gim, S.O., Kim, S.H. ve Lee G.W., “Flow control behind a circular cylinder by control rods in uniform stream”, *Ocean Engineering* 38, 2171-2184, 2011.

Goldenstein, S., “Modern developments in fluid dynamics”, *Oxford Press*, London, 1938.

Gregory, J.W., Enloe, C.L., Gabriel, I.F., ve McLaughlin, T.E., “Force production mechanisms of a Dielectric-Barrier Discharge plasma actuator United States air force academy”, USAF Academy, CO., 80840, *AIAA*, 0185, 2007.

Humpreys, J.S., “On a circular cylinder in a steady wind at transition Reynolds numbers”, *Jour. Fluid Mech.* 9, 1960.

Jiang R.J., “Flow-induced vibrations of two tandem cylinders in a channel”, *Thermal Science* 16, 1377-1381, 2012.

Kogelschatz, U., “Filamentary, patterned and diffuse barrier discharges” *IEEE Trans. Plasma Sci.* 30, 1400–8, 2002.

Nehra, V., Kumar, A. ve Dwivedi H.K., “Atmospheric non-thermal plasma sources”, *International Journal of Engineering* 2, 53-68, 2008.

Olsen, J.F. ve Rajagapalan, S., “Vortex shedding behind modified circular cylinders”, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 86, 55-63, 2000.

Reza-zadeh, S., “Investigation of fluid flow around a cylinder with EHD actuation on inclined plates behind the cylinder”, *Proceedings of the 2013 International Conference on Applied Mathematics and Computational Methods in Engineering*, 2013.

Roth, J. R., “Electrohydrodynamically induced airflow in a one atmosphere uniform glow discharge surface plasma”, *25th IEEE Int. Conf. Plasma Science*, Raleigh, USA, 1998.

Roth, J.R., Sherman, D.M., ve Wilkinson, S.P., “Electrohydrodynamic flow control with a glow discharge surface plasma”, *AIAA Journal* 38, 1172–9, 2000.

Roth, J.R., “Aerodynamic flow acceleration using piezoelectric and peristaltic electrohydrodynamic (EHD) effects of a one atmosphere uniform glow discharge plasma (OAUGDPTM)” *Phys. Plasmas* 10, 2117–26, 2003

Sarioglu, M., Akansu, Y.E. ve Yavuz, T., “Control of the flow around a square cylinder at incidence by using a rod”, *AIAA Journal* 43-7, 1419-1426, 2005.

Smith, B.L. and Glezer, A., “The formation and evolution of synthetic jets”, *Physics of Fluids* 31, 2281-97, 1998.

Şanlısoy, A., Plazma aktüatörün NACA2415 model uçak kanadı etrafındaki akış kontrolü üzerine etkisinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Niğde Üni. Fen Bilimleri Enstitüsü*, Niğde, s. 64-71, 2013.

Timoth, N., Jukes, K. ve So, C., “Control of unsteady flow seperation over a circular cylinder using DBD surface plasma”, *Physics of Fluids* 21, 094106, 2009.

Tuck, A. ve Soria, J., “Separation control on a NACA 0015 airfoil using a 2D micro ZNMF jet”, *Aircraft Engineering and Aerospace Technology* 80, 175-180, 2008.

URL-1 « Tamasek Laboratories,» 2012. [Çevrimiçi]. Available: http://www.temasek-lab.nus.edu.sg/program/program_aeroexperimental_highlight4.php. [tarihinde erişilmiştir 03 Haziran 2013]

Wagner, H.E., Brandenburg, R., Kozlov, K.V., Sonnenfeld, A., Michel, P. ve Behnke, J. F., “The barrier discharge: basic properties and applications to surface treatment”, *Vacuum* 71, 417–36, 2003.

Werlé H., "An album of fluid motion", *Rech. Aerosp.* 5, 35-49

Yeşildağ, C., DBD plazma aktüatör ile kare kesitli küt cisim etrafındaki akış kontrolünün incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Niğde Üni. Fen Bilimleri Enstitüsü*, Niğde, s. 62-78, 2013.

Yokoyama, S., Kogoma, M., Morikawi, T., ve Okazaki, S., “The mechanisms of the stabilized glow plasma at atmospheric pressure” *J. Phys. D: Appl. Phys.* 23, 11258, 1990.

Zdravkovich, M.M., “Review of interference-induced oscillations in flow past 2 parallel circular cylinders in various arrangements”, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 28, 183-200, 1988.

Zhang, P.F., Wang, J.J. ve Huang, L.X., “Numerical simulation of flow around cylinder with an upstream rod in tandem at low Reynolds numbers”, *Applied Ocean Research* 28, 183-192, 2006.

EKLER

Ek-A Belirsizlik Analizi

Ek-A Belirsizlik Analizi

Bu çalışmada ölçülen ve hesaplanan parametrelerin belirsizlik değerleri Coleman ve Steele (1998) tarafından sunulan yöntemler ile belirlenmiştir. Deney parametreleri denklem E-1 formunda fonksiyonlardır.

$$r = kX_1^a X_2^b X_3^c \dots \quad (\text{E.1})$$

Bu formdaki fonksiyonun belirsizlik ifadesi denklem E-2'de ifade edilmiştir.

$$u_r = \frac{w_r}{r} = \left[a^2(u_{x_1})^2 + b^2(u_{x_2})^2 + c^2(u_{x_3})^2 + \dots \right]^{1/2} \quad (\text{E.2})$$

Bu çalışma kapsamında deneysel olarak hız, kuvvet, yoğunluk, sıcaklık vb. parametreler ölçülmüş olup bu ölçüm sonuçları kullanılarak Reynolds sayısı ve sürüklenme kuvveti katsayısı sayısı hesaplanmıştır.

Kullanılan parametrelerin belirsizliğinin tespiti

Burada kullanmakta olduğumuz diğer bağımlı ve bağımsız değişkenler, Atmosfer basıncı (P_{atm}), sıcaklık (T), dairesel silindir çapı (D), model uzunluğu (L), sürüklenme kuvveti (F_D), dinamik viskozite (μ), kızgın tel anemometresi ile ölçülen hız (U_{CTA}), belirsizlik değerlerinin bilinmesi gerekmektedir. Burada bağımsız değişkenlere ait belirsizliklerin tespitinde kullanılan ölçüm cihazlarının kullanım kılavuzları ve benzer belirsizlik analizlerini çalışmalarında kullanan Jorgensen (2002), Akansu (2004), Akansu ve Karakaya (2013), Şanlısoy (2013) ve Yeşildağ'ın (2013) (Referanslara yaz) çalışmalarından faydalanılmıştır.

- 85 kPa atmosfer basıncının ölçümünde 1 kPa hata oluşabilmektedir. Bu durumda atmosfer basıncının belirsizliği %1.1 olarak elde edilir.

$$\left(u_{P_{\text{atm}}} = \frac{w_{P_{\text{atm}}}}{P_{\text{atm}}} \cong \frac{1000}{85000} = 0.011 = \%1.1 \right)$$

Ek-A (Devam) Belirsizlik Analizi

- Sıcaklık ölçümünde ölçümde kullanılan Manoair500 model micromanometrenin sıcaklık probunun 0-70°C aralığında hatası 0.2°C olarak kullanım klavuzunda hata olabileceği belirtilmiştir.. Bu durumda 29°C'deki sıcaklığın ölçümünde, sıcaklığa ait belirsizlik %0.0662 olarak elde edilir.

$$\left(u_T = \frac{w_T}{T} \cong \frac{0.2}{302} = 0.000662 = \%0.0662 \right)$$

- 40 mm dairesel silindirin çapının ölçümünde oluşan 0.25 mm'lik hata nedeni ile oluşan belirsizlik %1.25'dir. $\left(u_D = \frac{w_D}{D} \cong 0.0625 = \%0.625 \right)$
- 400 mm dairesel silindir model uzunluğunun ölçümünde oluşan 0.25 mm'lik hata nedeni ile oluşan belirsizlik %0.125'dir. $\left(u_L = \frac{w_L}{L} \cong 0.000625 = \%0.0625 \right)$
- 25°C sıcaklığındaki havanın 2°C değişimi ile dinamik viskozitesindeki oluşan belirsizlik, %0.51' dir. $\left(u_\mu = \frac{w_\mu}{\mu} \cong 0.00508 = \%0.51 \right)$

Yoğunluğun belirsizliğinin hesaplanması

$\rho = \frac{P_{atm}}{RT}$ olarak tanımlanan yoğunluk için belirsizlik değeri, atmosfer basıncı ve sıcaklık değerine bağlı olarak değişmektedir. Yoğunluk için belirsizlik denklemi,

$$u_\rho = \frac{w_\rho}{\rho} = \left[(1)^2 \left(\frac{w_{P_{atm}}}{P_{atm}} \right)^2 + (-1)^2 \left(\frac{w_T}{T} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (E.3)$$

olarak bulunur ve yoğunluğun belirsizliği denklem E-3 kullanılarak hesaplanabilmektedir.

Denklem E-3'de atmosfer basıncının ve sıcaklığın belirsizliğinin değerlerinin yazılması ile yoğunluğun belirsizliği $u_\rho \cong 0.011$ veya %1.1 olarak elde edilir.

Ek-A (Devam) Belirsizlik Analizi

Ön bakış alanının belirsizliğinin hesaplanması

$A_{\text{ön}} = D \times L$ olarak tanımlanan ön bakış alanın değeri dairesel silindirin çapı ve model uzunluğuna bağlı olarak değişmektedir. Ön bakış alanının bağlı belirsizliği denklem E-4' de verilmiştir.

$$u_{A_{\text{ön}}} = \frac{w_{A_{\text{ön}}}}{A_{\text{ön}}} = \left[\left(\frac{w_D}{D} \right)^2 + \left(\frac{w_L}{L} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (\text{E.4})$$

Denklem E-4'de dairesel silindirin çapı ve model uzunluğunun belirsizliğinin yerine koyulması ile ön bakış alanının belirsizliği $u_{A_{\text{ön}}} \cong 0.00628$ veya %0.628 olarak elde edilir.

Sürüklenme kuvvetinin ölçümünde oluşan belirsizlikler

Sürüklenme kuvvet katsayısına etki eden belirsizlik değerleri $U_0=1.5$ m/s ($Re= 3800$) değeri için elde edilmiştir.

X₁-) Kuvvet ölçümünde yük hücresinin belirsizlik değeri y-yönünde %1'dir. $\left(u_{X_1} = \frac{w_{X_1}}{X_1} \cong 0.01 = \%1 \right)$

X₂-) Hücum açısındaki 1°'lik hata nedeni ile kuvvet ölçümünde oluşan belirsizlik %0.6'dir. $\left(u_{X_2} = \frac{w_{X_2}}{X_2} \cong 0.006 = \%0.6 \right)$

X₃-) Veri toplama kartı çözünürlüğü nedeni ile oluşan belirsizlik %0.34'dür. $\left(u_{X_3} = \frac{w_{X_3}}{X_3} \cong 0.0034 = \%0.34 \right)$

Ek-A (Devam) Belirsizlik Analizi

X₄-) Kalibrasyon işleminde uç plaka ve model tutucu çubuğa etki eden kuvvetlerin hesaplamansında oluşan belirsizlikler yaklaşık %5 olarak alınmıştır. $(u_{X_4} = \frac{w_{X_4}}{X_4} \cong 0.05 = \%5)$

Bu belirsizlikler dikkate alınarak sürükleme kuvveti ölçümünde oluşan toplam belirsizlik;

$$\frac{w_{F_D}}{F_D} = \left[\left(\frac{w_{X_1}}{X_1} \right)^2 + \left(\frac{w_{X_2}}{X_2} \right)^2 + \left(\frac{w_{X_3}}{X_3} \right)^2 + \left(\frac{w_{X_4}}{X_4} \right)^2 \right]^{1/2}$$

$$u_{F_D} = \frac{w_{F_D}}{F_D} = [(0.01)^2 + (0.001)^2 + (0.0034)^2 + (0.05)^2]^{1/2} \cong 0.051$$

%5.1 olarak Reynolds sayısının 7300 değeri için sonuç elde edilmiştir.

Kızgın tel anemometresi ile hız ölçümünde oluşan belirsizlikler

Kızgın tel anemometresi ile hız ölçümüne etki eden belirsizlik değerleri $U_0 = 1.8$ m/s ($Re=3800$) değeri için elde edilmiştir.

X₅-) Anemometreye ait belirsizlikler; gürültü, tekrarlanabilirlik ve frekans algılamasından oluşan belirsizlikler %0.5 mertebesindedir. $(\frac{w_{X_5}}{X_5} \cong 0.005 = \%0.5)$

X₆-) Kalibrasyon işleminde, 1.8 m/s'lik hız değerinde, kalibrasyon cihazında oluşan belirsizlik %5.1'dir. $(\frac{w_{X_6}}{X_6} \cong 0.048 = \%4.8)$

X₇-) Lineerleştirme veya kalibrasyon eğrisi işleminden oluşan belirsizlik %0.5'dür. $(\frac{w_{X_7}}{X_7} \cong 0.005 = \%0.5)$

X₈-) 2.0 m/s hızda $\frac{\partial U}{\partial E} = \frac{19,3 \text{ m/s}}{\text{volt}}$ luk değişim için 0-5V aralığında 16 bit'lik A/D

Ek-A (Devam) Belirsizlik Analizi

dönüştürücü kartın çözünürlüğünden oluşan belirsizlik %0.13'dir. ($\frac{W_{X_8}}{X_8} \cong 0.0013 =$
%0.13)

X₉-) Prob pozisyonunda 1°'lik hata nedeniyle hızda oluşan belirsizlik %0.009'dur.
($\frac{W_{X_9}}{X_9} \cong 0.00009 = \%0.009$)

X₁₀-) Prob çalışma sıcaklığındaki 2°C'lik sıcaklık değişimi nedeni ile hızda oluşan
belirsizlik %1.53'dir. ($\frac{W_{X_{10}}}{X_{10}} \cong 0.0153 = \%1.53$)

X₁₁-) Hava yoğunluğundaki 2°C'lik sıcaklık değişimine bağlı olarak hızda oluşan
belirsizlik %0.39'dur. ($\frac{W_{X_{11}}}{X_{11}} \cong 0.0039 = \%0.39$)

X₁₂-) Atmosfer basıncındaki 1 kPa'lık değişim nedeni ile hızda oluşan belirsizlik %0.68'
dir. ($\frac{W_{X_{12}}}{X_{12}} \cong 0.0068 = \%0.68$)

Bu belirsizlikler dikkate alınarak hız ölçümünde oluşan toplam belirsizlik;

$$u_{U_{CTA}} = \frac{W_{U_{CTA}}}{U_{CTA}} = \left[\left(\frac{W_{X_5}}{X_5} \right)^2 + \left(\frac{W_{X_6}}{X_6} \right)^2 + \left(\frac{W_{X_7}}{X_7} \right)^2 + \left(\frac{W_{X_8}}{X_8} \right)^2 + \left(\frac{W_{X_9}}{X_9} \right)^2 + \left(\frac{W_{X_{10}}}{X_{10}} \right)^2 + \left(\frac{W_{X_{11}}}{X_{11}} \right)^2 + \left(\frac{W_{X_{12}}}{X_{12}} \right)^2 \right]^{1/2}$$

$$u_{U_{CTA}} = \frac{W_{U_{CTA}}}{U_{CTA}} = [(0.005)^2 + (0.048)^2 + (0.005)^2 + (0.0013)^2 + (0.00009)^2 + (0.0153)^2 + (0.0039)^2 + (0.0068)^2]^{1/2} \cong 0.0515 = \%5.15$$

%5.15 olarak elde edilir.

Boyutsuz sayıların belirsizlik değerlerinin hesaplanması

Reynolds sayısının belirsizlik değerinin hesaplanması:

$Re = \frac{\rho U_{CTA} H}{\mu}$ şeklinde tanımlanan Re sayısı için belirsizlik değeri, ρ , U_{CTA} , H ve μ değerine bağlı olarak değişmektedir. Denklem E-2 kullanılarak Re sayısının belirsizlik değeri hesaplanabilmektedir (Denklem E-5).

$$u_{Re} = \frac{w_{Re}}{Re} = \left[(u_{\rho})^2 + (u_{U_{CTA}})^2 + (u_D)^2 + (u_{\mu})^2 \right]^{1/2} \quad (E.5)$$

Reynolds sayısının belirsizlik değeri, daha önce yukarıda tespit edilen; yoğunluk, hız, karakteristik uzunluğun ve dinamik viskozitenin belirsizliğinin denklem E-5'de yerine yazılması ile hesaplanmaktadır.

$$u_{Re} = \frac{w_{Re}}{Re} = [(0.011)^2 + (0.0515)^2 + (0.00625)^2 + (0.00508)^2]^{1/2} = 0.084 \\ = \%5.3$$

Sürüklenme kuvveti katsayısının belirsizlik değerinin hesaplanması:

$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2}(\rho)(U_{CTA})^2 \cdot (A_{\text{ön}})}$ denklemi ile hesaplanan sürüklenme kuvveti katsayısının belirsizliğini belirlemek için benzer şekilde denklem E-2 kullanılmaktadır. Denklem E-2 kullanılarak Sürüklenme kuvveti katsayısının belirsizlik değeri hesaplanabilmektedir (Denklem E-6).

$$u_{C_D} = \frac{w_{C_D}}{C_D} = \left[(u_{F_D})^2 + (u_{\rho})^2 + 4(u_{U_{CTA}})^2 + (u_{A_{\text{ön}}})^2 \right]^{1/2} \quad (E.6)$$

Sürüklenme kuvveti katsayısının belirsizliğinin değeri, daha önce yukarıda tespit edilen; sürüklenme kuvveti, yoğunluk, hız, ön bakış alanının belirsizliğinin denklem E-6'da yerine yazılması ile sürüklenme kuvveti katsayısının belirsizliği hesaplanmaktadır.

Ek-A (Devam) Belirsizlik Analizi

$$u_{C_D} = \frac{w_{C_D}}{C_D} = [(0.051)^2 + (0.011)^2 + 4(0.0515)^2 + (0.00628)^2]^{1/2} = 0.116$$
$$\cong \%11.6$$

ÖZ GEÇMİŞ

Hürrem AKBIYIK 19.03.1987 tarihinde Adana'da doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Adana'de tamamladı. 2006 yılında girdiği Niğde Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümünden Haziran 2012'de mezun oldu. 2009-2010 döneminde kazandığı LLP-ERASMUS bursu kapsamında Kecskemet Üniversitesinde (Macaristan) Lisans eğitimi ve 2010-2011 döneminde kazandığı LLP-ERASMUS Staj programı kapsamında Kecskemet Üniversitesinde (Macaristan) çalışmalarına devam etti. 2012 yılında Niğde Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalında Yüksek Lisansa başladı. 2012-2013 yılları arasında Niğde Üniversitesi Makine Mühendisliği bölümünde TUBİTAK 110M056 nolu projede proje asistanı (bursiyeri) olarak görev aldı. Aynı zamanda 2012 yılında Niğde Üniversitesi Mekatronik Mühendisliği bölümünde Araştırma Görevliliğine başladı ve bu göreve halen devam etmektedir.